

**Proyecto de directrices sobre las
mejores técnicas disponibles y
las mejores prácticas
ambientales**

**Procesos de fundición y calcinación*
utilizados en la producción de metales no
ferrosos (plomo, zinc, cobre y oro industrial
según se especifica en el anexo D del
Convenio)**

Subgrupo de fundición de metales no ferrosos (cobre, oro, plomo y zinc)

Directrices sobre mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales, y estudios monográficos

Resumen

El principal objetivo del proceso de fundición es convertir los concentrados metálicos desde su estado nativo a metales puros. En consecuencia, la fundición es una forma de metalurgia extractiva. Los metales suelen existir en la naturaleza como óxidos, sulfuros o carbonatos y el proceso de fundición requiere una reacción química en presencia de un agente reductor para liberar el metal. El mercurio existe en cantidades traza en casi todas las materias primas metalúrgicas, y el proceso térmico puede liberar mercurio a la atmósfera.

La producción de metales en general, y la producción de metales no ferrosos en particular, constituyen una gran fuente de emisiones de mercurio antropógenas y, según estimaciones, representan alrededor del 10% de las emisiones a nivel mundial. Se reconoce que esta estimación está sujeta a un grado apreciable de incertidumbre, y que para gestionar el mercurio a nivel local de planta será preciso contar con datos específicos para cada emplazamiento.

En el presente capítulo se ofrece orientación sobre las opciones de control del mercurio proveniente del sector de metales no ferrosos (específicamente para el cobre, el zinc, y el oro industrial, conforme se enumeran en el Convenio). Su objetivo es proporcionar a las Partes en el Convenio de Minamata directrices sobre la determinación de las mejores técnicas disponibles y las mejores prácticas ambientales, para posibilitarles cumplir sus obligaciones contraídas con arreglo al Convenio.

Las directrices se refieren únicamente a los procesos de fundición y tostación* empleados en la producción de los metales no ferrosos antes mencionados. Otros procesos diferentes a la fundición y la tostación, como los procesos hidrometalúrgicos, también pueden dar lugar a emisiones de mercurio, pero no figuran enumerados en el anexo D del Convenio. En consecuencia, en las presentes directrices no se incluyen esos otros procesos.

La fundición secundaria de metales del sector no ferroso suele producir cantidades insignificantes de emisiones de mercurio, debido a que en los procesos de reciclaje de metales se usan chatarra y escoria como insumos. Una excepción a este respecto puede observarse en la fundición secundaria de desechos electrónicos, pero probablemente las técnicas empleadas para reducir las emisiones resultantes de la fundición secundaria no difieren sustancialmente de las empleadas para la fundición primaria.

En el anexo se presentan los procesos necesarios para la producción de los metales incluidos en las directrices (cobre, zinc, plomo y oro industrial). Abarca tecnologías de control, incluidas tanto las tecnologías diseñadas específicamente para el control de las emisiones de mercurio como las tecnologías de control de otros contaminantes que pueden rendir beneficios paralelos en cuanto a reducir las emisiones de mercurio. Se describen nuevas tecnologías, y se brindan directrices sobre las mejores técnicas disponibles y las mejores prácticas ambientales. También se brinda información sobre la monitorización específica para el sector de los metales no ferrosos.

*** N. del T.:** En el texto del presente anexo, salvo en su título, en lugar del término “calcinación” (según figura en el anexo D del Convenio de Minamata), se emplea “tostación”, por cuanto, aunque en general son sinónimos técnicamente, el primero se emplea preferentemente en el sector de la producción de cemento, y el segundo se emplea preferentemente en el sector de la metalurgia, especialmente en los procesos de producción de metales no ferrosos.

Índice

1	Introducción.....	6
2	Descripción de los procesos.....	7
2.1	Etapas del proceso en la producción de plomo.....	7
2.1.1	Pretratamiento del concentrado.....	7
2.1.2	Fundición.....	7
2.1.3	Afino.....	8
2.1.4	Planta de ácido sulfúrico.....	8
2.2	Etapas del proceso de producción de zinc.....	10
2.2.1	Mezcla, tostación y recuperación del polvo.....	10
2.2.2	Limpieza del gas.....	10
2.2.3	Planta de ácido sulfúrico.....	11
2.2.4	Lixiviación.....	12
2.3	Etapas del proceso de producción de cobre.....	12
2.3.1	Secado del concentrado.....	12
2.3.2	Tostación.....	12
2.3.3	Fundición.....	12
2.3.4	Conversión.....	13
2.3.5	Afino y vaciado.....	13
2.3.6	Limpieza de la escoria.....	13
2.3.7	Planta de ácido sulfúrico.....	13
2.4	Etapas del proceso de producción de oro.....	14
2.4.1	Tostación.....	14
2.4.2	Lixiviación.....	15
2.4.3	Decapado y regeneración.....	15
2.4.4	Afino.....	15
2.4.5	Horno.....	15
3	Técnicas de control de las emisiones.....	17
3.1	Proceso Boliden Norzink.....	17
3.1.1	Descripción.....	17
3.1.2	Aplicabilidad.....	18
3.1.3	Eficacia.....	19
3.1.4	Efectos recíprocos entre los distintos medios.....	19
3.1.5	Gastos de instalación y funcionamiento.....	19
3.2	Filtro de selenio.....	19

3.2.1	Descripción	19
3.2.2	Aplicabilidad.....	20
3.2.3	Grado de eficacia	20
3.2.4	Gastos de instalación y funcionamiento.....	20
3.2.5	Efectos recíprocos entre los distintos medios	21
3.3	Carbón activado	21
3.3.1	Descripción	21
3.3.2	Aplicabilidad.....	21
3.3.3	Grado de eficacia	21
3.3.4	Gastos de instalación y funcionamiento.....	21
3.3.5	Beneficios paralelos.....	22
3.3.6	Efectos recíprocos entre los distintos medios	22
3.4	Proceso de filtración DOWA (filtro de piedra pómez recubierto de sulfuro de plomo (II)	22
3.5	Proceso Jerritt	22
3.5.1	Descripción	22
3.5.2	Aplicabilidad.....	23
3.5.3	Eficacia	23
3.5.4	Efectos recíprocos entre los distintos medios	23
3.5.5	Gastos de instalación y funcionamiento.....	23
3.6	Beneficios paralelos de las tecnologías comunes y las plantas de ácido para la reducción de la contaminación atmosférica en el control del mercurio.....	24
3.6.1	Tecnologías de reducción de la contaminación	24
3.6.1.1	Filtros de bolsa.....	24
3.6.1.2	Precipitadores electrostáticos	24
3.6.1.3	Depuradores	24
3.6.2	Depuración de gases combinada con plantas de ácido	25
3.6.2.1	Descripción	25
3.6.2.2	Aplicabilidad.....	25
3.6.2.3	Grado de eficacia	25
3.6.2.4	Costos.....	25
3.6.2.5	Beneficios paralelos.....	26
3.6.2.6	Efectos recíprocos entre los distintos medios	26
4.	Mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales	27
4.1	Sinopsis de las mejores técnicas disponibles	27
4.1.1	Otras consideraciones al seleccionar el tipo de control del mercurio durante el proceso de tostación y fundición en el sector de la metalurgia no ferrosa	29
4.2	Mejores prácticas ambientales	32
4.2.1	Sistemas de gestión ambiental.....	32

4.2.2	Mezcla de materias primas para controlar las emisiones de mercurio	32
4.2.3	Emisiones de mercurio a la atmósfera	33
4.2.4	Control de partículas.....	33
4.2.5	Gestión y eliminación ambientalmente racionales de los desechos derivados del control de la contaminación atmosférica.....	33
5	Monitorización del mercurio en los procesos de fundición y afino durante la producción de metales no ferrosos	34
5.1	Métodos de medición directa	34
5.1.1	Muestreo por borboteadores.....	34
5.1.2	Trampas sorbentes y sistemas de monitorización por trampas sorbentes.....	34
5.1.3	Sistemas de monitorización continua de las emisiones	34
5.2	Métodos de medición indirecta	35
5.2.1	Balance de materia.....	35
5.2.2	Sistemas predictivos de monitorización de las emisiones	35
5.2.3	Factores de emisión	35
6	Referencias.....	36

1 Introducción

El mercurio existe como elemento traza en casi todas las materias primas metalúrgicas y por ello es posible que el tratamiento térmico y otras operaciones de fundición liberen mercurio a la atmósfera. El principal objetivo del proceso de fundición es convertir los metales desde su estado nativo como mineral en bruto en metales puros, y por ello la fundición constituye una forma de metalurgia extractiva. Los metales suelen existir en la naturaleza como óxidos, sulfuros o carbonatos, y el proceso de fundición requiere una reacción química en presencia de un agente reductor para liberar el metal.

En el Informe sobre la Evaluación Mundial sobre el Mercurio del PNUMA correspondiente a 2013 (AMAP/UNEP 2013) se presenta un inventario de emisiones para 2010, que, aunque se basa en el inventario para 2005, y semeja en su totalidad a este, que fue presentado en un informe del PNUMA correspondiente a 2008 (AMAP/UNEP 2008), incorpora algunas diferencias importantes en varios de los sectores principales. Los datos incluidos en ambos inventarios ilustran que la producción de metales en general, y la producción de metales no ferrosos en particular, constituyen una gran fuente antropógena de emisiones de mercurio que, según estimaciones, representan alrededor del 10% de las emisiones a nivel mundial. Se reconoce que esta estimación está sujeta a considerable incertidumbre, y que para gestionar el mercurio a nivel local de planta será preciso contar con datos específicos para cada emplazamiento.

El presente documento de directrices trata sobre las alternativas de control del mercurio proveniente del sector de los metales no ferrosos (específicamente para el cobre, el zinc, el plomo y el oro industrial conforme se enumeran en el Convenio). Su objetivo es proporcionar a las Partes en el Convenio de Minamata directrices sobre la determinación de las mejores técnicas disponibles y las mejores prácticas ambientales para posibilitarles cumplir sus obligaciones contraídas con arreglo al Convenio.

Las directrices se refieren únicamente a los procesos de fundición y tostación empleados en la producción de los metales no ferrosos antes mencionados. Otros procesos diferentes a la fundición y la tostación, como los procesos hidrometalúrgicos, también pueden generar emisiones de mercurio, pero no figuran enumerados en el anexo D del Convenio. En consecuencia, en las presentes directrices no se incluyen esos otros procesos.

La fundición secundaria de metales produce cantidades insignificantes de emisiones de mercurio, debido a que, de hecho, en los procesos de reciclaje de metales se usan chatarra y escoria como insumos. El único caso en que puede haber pequeñas cantidades de mercurio liberado es durante el reciclaje de pilas de zinc que contienen cantidades traza del elemento. Habida cuenta de los requisitos establecidos en el tratado relativos a productos (controlados con arreglo al artículo 4, que permite el contenido de mercurio en pilas de botón zinc-óxido de plata según se establece en el anexo A), también cabe esperar que el contenido de mercurio de las pilas disminuya apreciablemente.

Esto se ve respaldado por los datos disponibles sobre las emisiones de mercurio resultantes de fundiciones secundarias. Por ejemplo, la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos dispuso la realización de pruebas de las emisiones de mercurio provenientes de varios hornos de fundición secundaria de plomo en los Estados Unidos en 2010, y estableció que en aproximadamente el 70% de los casos las emisiones eran inferiores al límite de detección.

En algunos casos, la fundición secundaria de material electrónico puede producir emisiones de mercurio importantes. No obstante, en esos casos suele utilizarse carbón activado para reducir las emisiones y por ello la fundición secundaria no se trata por separado en las presentes directrices.

2 Descripción de los procesos

La configuración de las operaciones de fundición y tostación está sujeta a las condiciones del emplazamiento y las características específicas de los minerales en bruto o los concentrados objeto del proceso, y frecuentemente consta de varias etapas. En la presente sección se ofrecen breves descripciones de los procesos de fundición y tostación pertinentes para los sectores del zinc, el cobre y el oro industrial.

La primera etapa en el tratamiento de los minerales en bruto de plomo, zinc y cobre es la producción de concentrados. Después, los concentrados suelen procesarse inicialmente mediante un proceso térmico, como la tostación, la sinterización o la fundición. Debido a la alta temperatura, el mercurio se volatilizará y, en consecuencia, estará presente en el gas de escape.

En el gas de escape, el mercurio se adsorberá a materia particulada o estará presente en forma de compuestos solubles de mercurio (por ejemplo, cloruro de mercurio (II)), y también estará presente como mercurio elemental. Generalmente las especies oxidadas de mercurio se pueden eliminar mediante depuradores y precipitadores electrostáticos húmedos. El mercurio oxidado unido a partículas se puede eliminar mediante cámaras de filtros de bolsa. No obstante, el mercurio elemental pasa a través de todo ese equipo estándar de limpieza de gas. En consecuencia, si el mercurio está presente en el mineral en bruto podría ser necesaria una segunda etapa de eliminación del mercurio para reducir su concentración a niveles aceptables. En la sección 3 se presentan alternativas.

La razón por la que el mercurio elemental no se puede eliminar eficazmente de una corriente de gas a temperatura ambiente solo mediante un depurador con agua se debe a su baja solubilidad en agua. Una posibilidad es adsorber el mercurio en sorbentes, como el carbón activado. Otra posibilidad es oxidar el mercurio de alguna manera idónea, de modo que después se pueda colectar en disolución o en forma de un compuesto sólido.

Si se procesan materias primas sulfídicas, el gas contendrá dióxido de azufre, que generalmente se usa para producir ácido sulfúrico. Para producir ácido sulfúrico que cumpla las normas comerciales, es necesario que el ácido tenga un bajo contenido de mercurio y estará sujeto al uso concreto del ácido.

Las técnicas para reducir las emisiones de mercurio resultantes de la fundición y la tostación en el sector no ferroso también pueden dar por resultado la producción de materiales que contengan mercurio. Ejemplo de ello es el calomelano (cloruro de mercurio (I)), que se produce en el proceso Boliden-Norzink (véase la sección **Error! Reference source not found.**). En estas directrices no se incluye la gestión de esos materiales, pero según lo dispuesto en el artículo 11 del Convenio, se deben almacenar o eliminar de manera ambientalmente racional como desechos.

El mercurio también puede estar presente en las aguas residuales producidas mediante esos procesos y requerirá almacenamiento o eliminación similares. Las aguas residuales provenientes de diferentes secciones de la planta suelen tratarse para eliminar elementos perjudiciales, como metales pesados, aceites residuales o trazas de reactivos químicos. Frecuentemente el mercurio se precipita como sulfuro de mercurio, muy poco soluble, y se elimina mediante decantación y filtración. Los lodos finales de la planta de tratamiento de las aguas residuales se almacenan adecuadamente como desechos. Los lodos que contienen mercurio deben gestionarse de manera ambientalmente racional de conformidad con otros artículos pertinentes del Convenio.

2.1 Etapas del proceso en la producción de plomo

El proceso de la producción de plomo primario consiste en tres etapas principales: pretratamiento del concentrado; sinterización o fundición, y afino. En la figura 1 se muestra una representación esquemática del proceso. El mercurio se libera principalmente durante los procesos de sinterización y fundición, y se debe captar para minimizar sus emisiones desde la chimenea final.

2.1.1 Pretratamiento del concentrado

En la etapa de pretratamiento del concentrado, diferentes concentrados de plomo se mezclan para formar una carga homogénea para el proceso de fundición. La mezcla de concentrado proporciona un contenido más consistente de metal en la materia prima y reduce los aumentos de impurezas que podrían causar alteraciones del proceso o ambientales, o problemas relativos a la calidad del producto. Durante la mezcla, se pueden añadir materias primas, como fundentes o materia particulada recuperada en la etapa final de los dispositivos de control de la contaminación. Con sujeción a los requisitos del proceso, los concentrados de plomo mezclados se pueden secar para disminuir el contenido de humedad. Durante el secado algunas emisiones de mercurio pueden liberarse, ya sea como mercurio gaseoso o como materia particulada.

2.1.2 Fundición

Existen dos procesos principales para fundir los concentrados de plomo. El proceso tradicional consiste primeramente en sinterizar los concentrados de plomo mezclados para eliminar el azufre y producir óxido de plomo. El producto de

la sinterización del óxido de plomo se carga en un alto horno en el que, mediante el uso de coque, se reduce a galápago de plomo.

El segundo proceso, desarrollado más recientemente, es la fundición directa de los concentrados de plomo (conocido también como fundición rápida). En la fundición directa, la oxidación y la red

ucción del plomo tienen lugar en un solo horno. El calor liberado mediante la oxidación del azufre en el concentrado impulsa la subsiguiente reacción de reducción para producir galápago de plomo mediante el uso de carbón. En comparación con el proceso de fundición de sinterización-alto horno, la fundición directa utiliza menos energía y genera menores niveles de emisiones al aire debido a un mejor grado de sellado y captación del gas residual.

El gas residual resultante del proceso de sinterización o fundición directa contiene materia particulada, dióxido de azufre, mercurio y otras impurezas. El gas residual se debe someter a limpieza de gas antes de ser utilizado para producir ácido sulfúrico.

2.1.3 Afino

El galápago de plomo se refina a través de varias etapas de tratamiento pirometalúrgico para eliminar otros metales e impurezas. Durante la etapa de eliminación de escorias, el galápago de plomo se enfría en una caldera hasta que se forma escoria en la superficie. La escoria, que contiene óxido de plomo y otros metales, se desescoria y se procesa en otro lugar para recuperar los metales. El galápago de plomo se refina ulteriormente añadiendo diversos reactivos en diferentes etapas para eliminar impurezas metálicas específicas. El plomo puro final se puede fundir en formas específicas o mezclar con otros metales para crear aleaciones. Alternativamente, el afino del plomo puede realizarse empleando una técnica de electroafino, que produce cátodos de plomo puro. Cabe esperar que durante el afino no se produzcan emisiones importantes de plomo.

2.1.4 Planta de ácido sulfúrico

El gas residual resultante de plantas de fundición o sinterización se procesa para eliminar la materia particulada y la mayoría de los metales, incluido el mercurio, mediante el uso de dispositivos de limpieza de gas, como depuradores y precipitadores electrostáticos. Si el gas todavía contiene una cantidad importante de mercurio, entonces se le hace pasar por una etapa de remoción de mercurio que elimine el mercurio como desecho. La gestión de los materiales que contienen mercurio, la cual incluye el almacenamiento, la eliminación y el comercio, se debe llevar a cabo acorde con otros artículos pertinentes del Convenio.

Tras la eliminación del mercurio, el gas contiene una alta concentración de dióxido de azufre, que suele convertirse en ácido sulfúrico en una planta de ácido. Todo mercurio remanente quedará contenido en el ácido. No obstante, los grados de calidad comercial generalmente especifican una concentración de mercurio inferior a 1 ppm en el ácido, por lo que resulta necesario eliminar eficazmente el mercurio antes que pase por la planta de ácido. Cabe esperar que las emisiones provenientes de la chimenea final contengan trazas de concentraciones de mercurio.

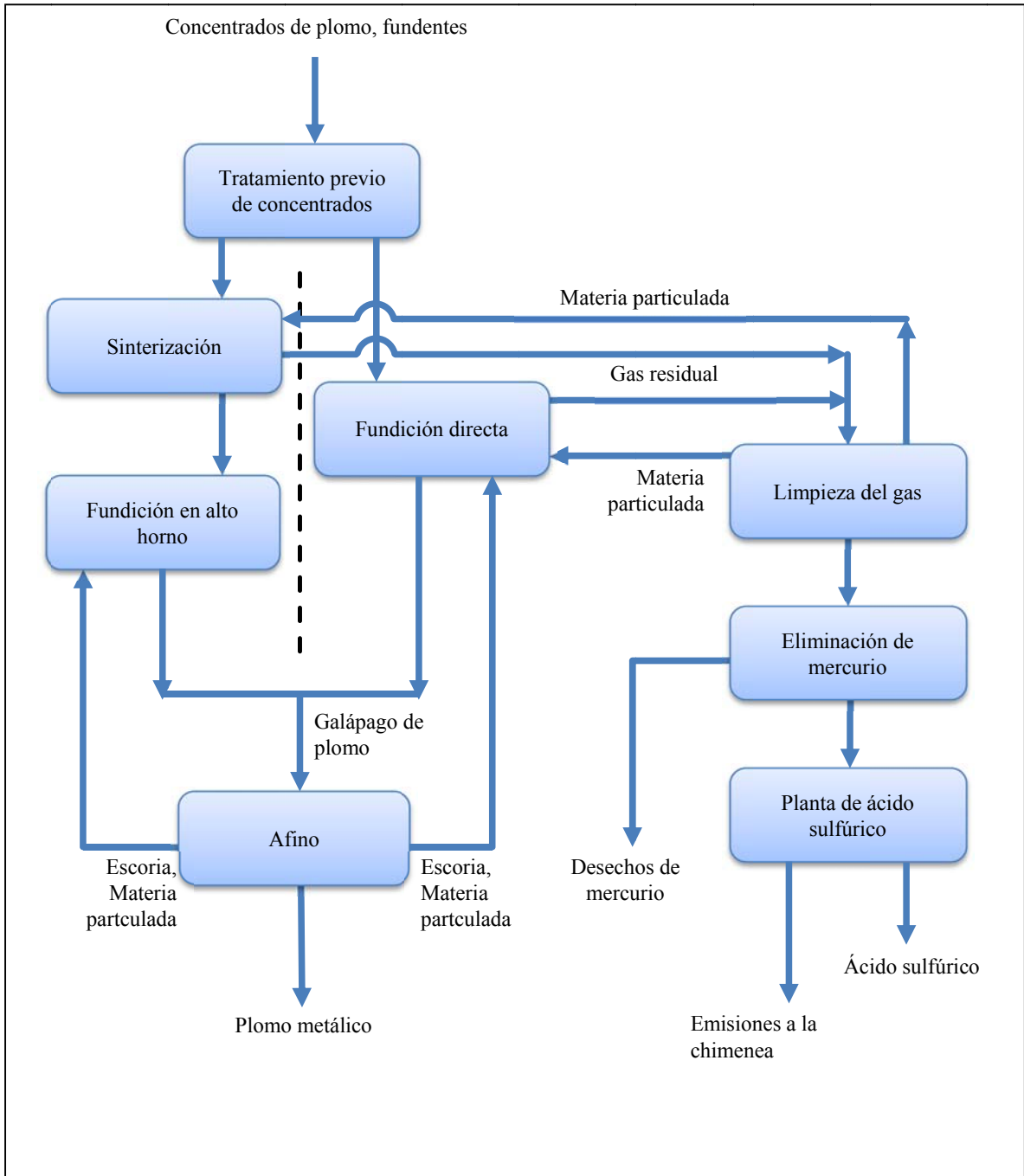


Figura 1: Procesos en la producción de plomo primario

2.2 Etapas del proceso de producción de zinc

El proceso primario de producción de zinc consiste en cinco etapas principales: mezcla de concentrado; tostación o sinterización y fundición; lixiviación y purificación; electroextracción, y fusión y aleación. En la figura 2 se ofrece una representación esquemática del proceso. El mercurio se libera principalmente durante el proceso de tostación y se debe captar para minimizar las emisiones de mercurio desde la chimenea final.

2.2.1 Mezcla, tostación y recuperación del polvo

En la figura 2 aparece una representación esquemática de las etapas del proceso en la producción de zinc. Debido a motivos de índole comercial y logística, cada refinería de zinc compra concentrados de zinc provenientes de minas diferentes. El contenido de mercurio proveniente de una sola mina puede variar entre 1ppm y 200 ppm, pero puede fluctuar hasta 1,000 ppm. La clave de lograr operaciones fluidas, gestionadas de manera ambientalmente racional y eficientes consiste en asegurar que todas las impurezas, incluido el mercurio, se alimenten al proceso del zinc en proporción controlada. La mezcla constituye un proceso de preparación de la carga bien establecido para mezclar concentrados de diferente calidad. Esto previene aumentos repentinos inesperados de impurezas que pueden causar alteraciones del proceso o ambientales, o acarrear problemas relativos a la calidad del producto.

Los concentrados de zinc se someten a tostación mediante inyección en un horno de lecho fluidizado a 950°C en que los sulfuros se transforman (tuestan) en óxidos y gas de SO₂. Para evitar las emisiones difusas, el horno se opera bajo presión negativa. Prácticamente todos los compuestos de mercurio presentes en los concentrados se vaporizarán en este horno. El polvo, también denominado materia particulada, se recupera de la corriente de gas. Ese polvo se dirige a la sección de lixiviación, conjuntamente con los óxidos de zinc resultantes de la tostación. El gas fluye hacia la etapa de limpieza del gas.

Alternativamente, en el proceso de fundición Imperial Smelting, los concentrados de zinc, o concentrados a granel que contienen zinc y plomo, primeramente se sinterizan y después se funden en un horno Imperial Smelting Furnace (ISF) (Morgan 1968).

2.2.2 Limpieza del gas

En la limpieza húmeda del gas, las últimas trazas de polvo se eliminan mediante dispositivos de reducción de la materia particulada, como depuradores y precipitadores electrostáticos. Las aguas residuales resultantes de esta limpieza del gas contienen mercurio y otros metales pesados y se someten a tratamiento en una planta de tratamiento de aguas residuales o se inyectan en un horno de tostación para maximizar la captación de mercurio mediante un proceso diseñado específicamente para la eliminación de mercurio. Existen diferentes tipos de procesos de eliminación de mercurio, los cuales se describen a continuación. Estas unidades diseñadas específicamente para la eliminación de mercurio reducen las concentraciones de mercurio a niveles bajos. El resultado final de este proceso de eliminación de mercurio es un concentrado de mercurio. Alrededor de entre 50% y 90% del insumo de mercurio total va a parar a ese concentrado.

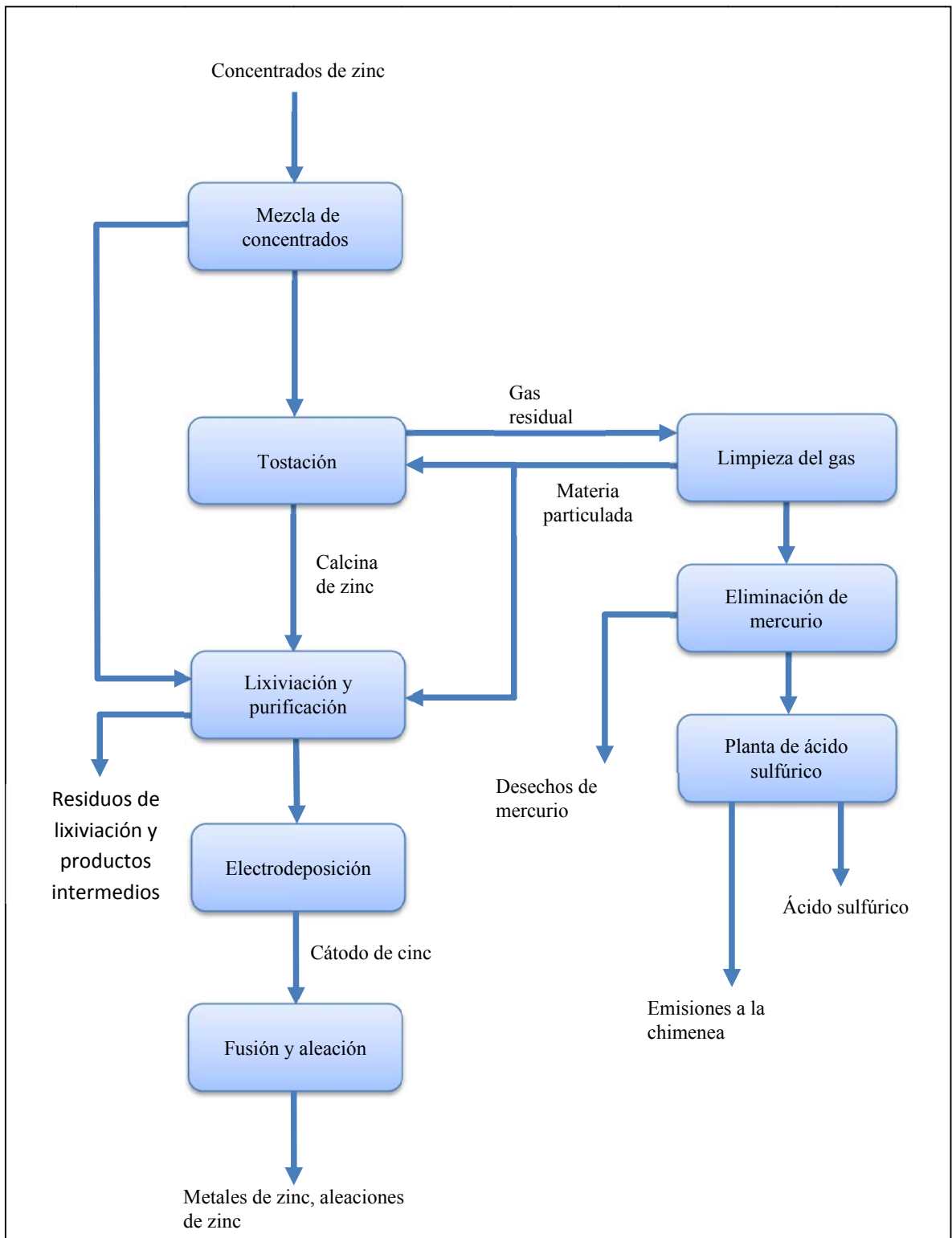


Figura 2: Procesos en la producción de zinc primario

2.2.3 Planta de ácido sulfúrico

Tras la eliminación del mercurio, el SO_2 proveniente del gas se transforma en ácido sulfúrico. Aproximadamente el 90% del mercurio residual en la corriente de gas quedará atrapado en el ácido. Para cumplir con las normas relativas a los grados comerciales del ácido sulfúrico, la concentración de mercurio en el ácido debe ser inferior a 1 ppm. Menos de 2% del insumo de mercurio total va a parar al ácido sulfúrico. Generalmente la emisión de mercurio desde la

chimenea en que se encuentran instalados los controles es inferior a 0,1 ppm, o menos de 100 µg/Nm³, y representa menos de un 0,25% del insumo de mercurio.

2.2.4 Lixiviación

En la etapa de lixiviación, el concentrado de óxido de zinc (conocido por “calcina de zinc”), se disuelve en el ácido. La disolución se purifica mediante cementación sobre polvo de zinc metálico (polvo), que no contiene mercurio y se envía a la planta de electrólisis para recuperar el zinc metálico. Otros metales –por ejemplo, cobre, cadmio, plomo, plata, cobalto y níquel– se recuperan por separado en fracciones y se refinan ulteriormente en otras plantas. Será necesario gestionar de conformidad con los artículos pertinentes del Convenio el residuo final de la lixiviación, que contiene principalmente hierro en forma de jarosita, goetita o hematita, sulfato de plomo y silicatos. El residuo lixiviable, que puede contener alguna cantidad de mercurio, se recicla mediante un proceso de fundición de plomo.

En el proceso de lixiviación, también puede haber una alimentación directa de concentrados minerales no sometidos a tostación que contienen mercurio. La adición de concentrados en el proceso de lixiviación puede representar alrededor del 10% del insumo total de concentrado, pero puede aumentar hasta alcanzar el 50% cuando se aplica la lixiviación directa. El mercurio proveniente de esos concentrados sin tostar va a parar al relave en forma de un sulfuro de mercurio casi insoluble. Debido a que el mercurio no se disuelve, en el proceso de lixiviación no se producen emisiones de mercurio a la atmósfera. Según la cantidad de concentrado sometido a tostación presente en esta etapa del proceso, entre 5% y 50% del insumo total de mercurio irá a parar a ese relave.

2.3 Etapas del proceso de producción de cobre

El cobre primario se puede producir mediante procesos pirometalúrgicos o hidrometalúrgicos. Aproximadamente entre 20% y 25% del cobre primario se produce mediante tecnologías hidrometalúrgicas, como la lixiviación de minerales oxidados en bruto. El resto de la producción de cobre primario emplea el proceso pirometalúrgico. Debido a que el proceso hidrometalúrgico no requiere tostación o fundición, ese tipo de procesos no están incluidos en el anexo D del Convenio de Minamata y, por lo tanto, se hallan fuera del alcance de las presentes directrices.

Los minerales en bruto de cobre que requieren tratamiento mediante el proceso pirometalúrgico son sulfídicos. Cuando se emplea el proceso pirometalúrgico, el mercurio presente en el concentrado se liberará primariamente durante la fusión del concentrado y la mata convirtiéndose en el gas de proceso. Con sujeción a la temperatura de los secadores empleados, en las instalaciones que usan un secador de concentrado el mercurio también puede ser emitido durante el proceso de secado.

En la figura 3 se ofrece una representación esquemática de diversos procesos pirometalúrgicos paralelos en la producción de cobre:

- Tostación, fundición y conversión
- Fundición y conversión
- Directo a fundición de cobre

2.3.1 Secado del concentrado

El proceso pirometalúrgico comienza con la mezcla de concentrados y fundentes para producir una carga estable y homogénea, especialmente cuando se procesan concentrados con diferentes concentraciones de cobre o impurezas. En el caso de los receptáculos de fusión rápida, los concentrados mezclados después se someten a secado para reducir el contenido de humedad. En esta etapa la humedad del concentrado se reduce hasta 0,2%, generalmente mediante secadores rotatorios, de bobinas múltiples, o de lecho fluidizado, que funcionan a una temperatura de punto de salida de entre 100°C y 200°C. Después el concentrado seco se envía al receptáculo de fusión y el polvo del gas del proceso de secado se elimina mediante cámaras de filtros de bolsa o precipitadores electrostáticos. En el caso de las instalaciones que emplean tecnología IsaSmelt, u otras similares, la mezcla de concentrado no se seca antes de introducirse en el receptáculo de fusión y convertirse en una mezcla de mata y escoria fundidas.

2.3.2 Tostación

Es posible que todavía se empleen tecnologías más antiguas en que los concentrados se someten a tostación antes de la fundición. En las instalaciones que emplean ese proceso, los concentrados mezclados se someten primeramente a tostación para convertir los sulfuros de cobre en óxidos antes de ser procesados en el horno de fundición. El gas del proceso de tostación, que contiene dióxido de azufre y cierta cantidad de mercurio, se procesa mediante depuradores y precipitadores electrostáticos para eliminar la materia particulada. Después el gas se envía a la planta de ácido.

2.3.3 Fundición

Una vez seca, la mezcla de concentrados y fundentes se funde para producir una mata (o, menos frecuentemente, cobre blíster), generalmente en una atmósfera enriquecida con oxígeno en un horno de fusión. Existen varios tipos de procesos de fundición de cobre que incluyen fusión rápida y fusión en baño. Otro proceso, que no se muestra en la figura 3, consiste en una etapa de varios hornos de fusión y conversión continuas, que produce cobre blíster.

En particular, la fusión rápida se emplea ampliamente, y es una tecnología eficiente mediante la cual el calor liberado resultante de la oxidación de los minerales azufrados impulsa el proceso de fundición. Además de producir la mata (o, menos frecuentemente, cobre blíster), la fusión produce una escoria. La temperatura de funcionamiento de los hornos fluctúa entre 1.230°C y 1.250°C. A esta temperatura, el mercurio elemental y los compuestos sulfurosos de mercurio se volatilizan totalmente. El gas del proceso se capta y envía al sistema de limpieza de gas.

2.3.4 Conversión

En los procesos de fundición que producen una mata de cobre, esta se transfiere después a la siguiente etapa del proceso: la conversión de mata o aleación de cobre (producido a partir de la limpieza de lo que se conoce por escoria de fusión “directa a cobre blíster”) en cobre blíster. Un subproducto de este proceso es la producción de escoria de convertidor, que se procesa para recuperar cobre en un horno de limpieza de escorias o se devuelve al horno de fusión. El gas de proceso generado por los convertidores se somete al procedimiento de eliminación de materia particulada y por último se mezcla con los gases provenientes del horno de fundición antes de entrar en el sistema de limpieza de gas de la planta de ácido sulfúrico.

2.3.5 Afino y vaciado

A continuación el cobre blíster se afina en hornos de ánodos, principalmente para eliminar el oxígeno, el azufre y los contaminantes traza. El gas de proceso generado en los hornos de ánodos se procesa en un depurador húmedo y después en un precipitador electrostático húmedo o en una cámara de filtros de bolsa. El cobre afinado se vacía en ánodos. La etapa final de la producción de cobre es el electroafino de los ánodos hacia cátodos de cobre que contienen más de 99,995% de cobre.

2.3.6 Limpieza de la escoria

La escoria fundida producida en el horno de fusión y los convertidores se puede tratar en un horno eléctrico de limpieza de escorias para recuperar el cobre y otros metales valiosos contenidos en la escoria. Esto produce una mata de alto grado que se transfiere a los convertidores. La escoria final se puede granular con agua. La escoria se envía para su eliminación o se utiliza como material agregado.

En los procesos que emplean fundición directa a cobre blíster, la limpieza de la escoria puede producir aleaciones de cobre, que se envían al horno de fundición para su reprocesamiento en convertidores.

Alternativamente, en vez de procesar la escoria en un horno de limpieza de escorias, la limpieza de la escoria se puede realizar mediante técnicas de procesamiento de minerales. Después que se enfría lentamente, la escoria se tritura, muele y procesa mediante flotación. Se produce un concentrado que contiene cobre y este se envía de vuelta a la fundición.

2.3.7 Planta de ácido sulfúrico

Los gases del proceso de fundición y conversión se dirigen a la sección de limpieza de gas de la planta de ácido sulfúrico. El gas del proceso primeramente se enfría y se procesa para eliminar la materia particulada, los metales y la neblina ácida mediante dispositivos de limpieza de gas, como depuradores y precipitadores electrostáticos húmedos. Durante la limpieza del gas, la temperatura del gas se enfría a entre 35°C y 40°C. La mayor parte del mercurio proveniente del horno de fusión se elimina en esta etapa mediante los tres mecanismos siguientes:

- Una porción del mercurio reacciona para formar sulfato de mercurio sólido, que se elimina como lodo.
- El mercurio elemental se condensa mediante temple y enfriamiento rápidos en depuradores y torres de enfriamiento empacadas.
- El selenio presente en los concentrados de cobre se libera en los procesos de fusión y conversión y queda contenido en el gas del proceso de fusión como óxido de selenio. El óxido de selenio se disuelve en la solución de depuración ácida débil e inmediatamente se reduce mediante dióxido de azufre para formar selenio rojo, que reacciona con el mercurio elemental para formar seleniuro de mercurio sólido. El seleniuro de mercurio es un compuesto de solubilidad extremadamente baja en agua, y estable en condiciones ácidas.

Después de efectuarse la limpieza del gas, antes de pasar a la producción de ácido posiblemente sea necesario emplear una tecnología diseñada específicamente para la eliminación de mercurio a fin de eliminar cualquier cantidad de mercurio remanente en el gas de proceso con miras a cumplir las normas comerciales. Cabe esperar que las emisiones provenientes de la chimenea final contengan concentraciones traza de mercurio. La gestión de los residuos y fangos que contienen mercurio resultantes de la limpieza del gas o de los procesos de eliminación del mercurio, entre los que figuran el almacenamiento, la eliminación y el comercio, deberá practicarse acorde con otros artículos pertinentes del Convenio.

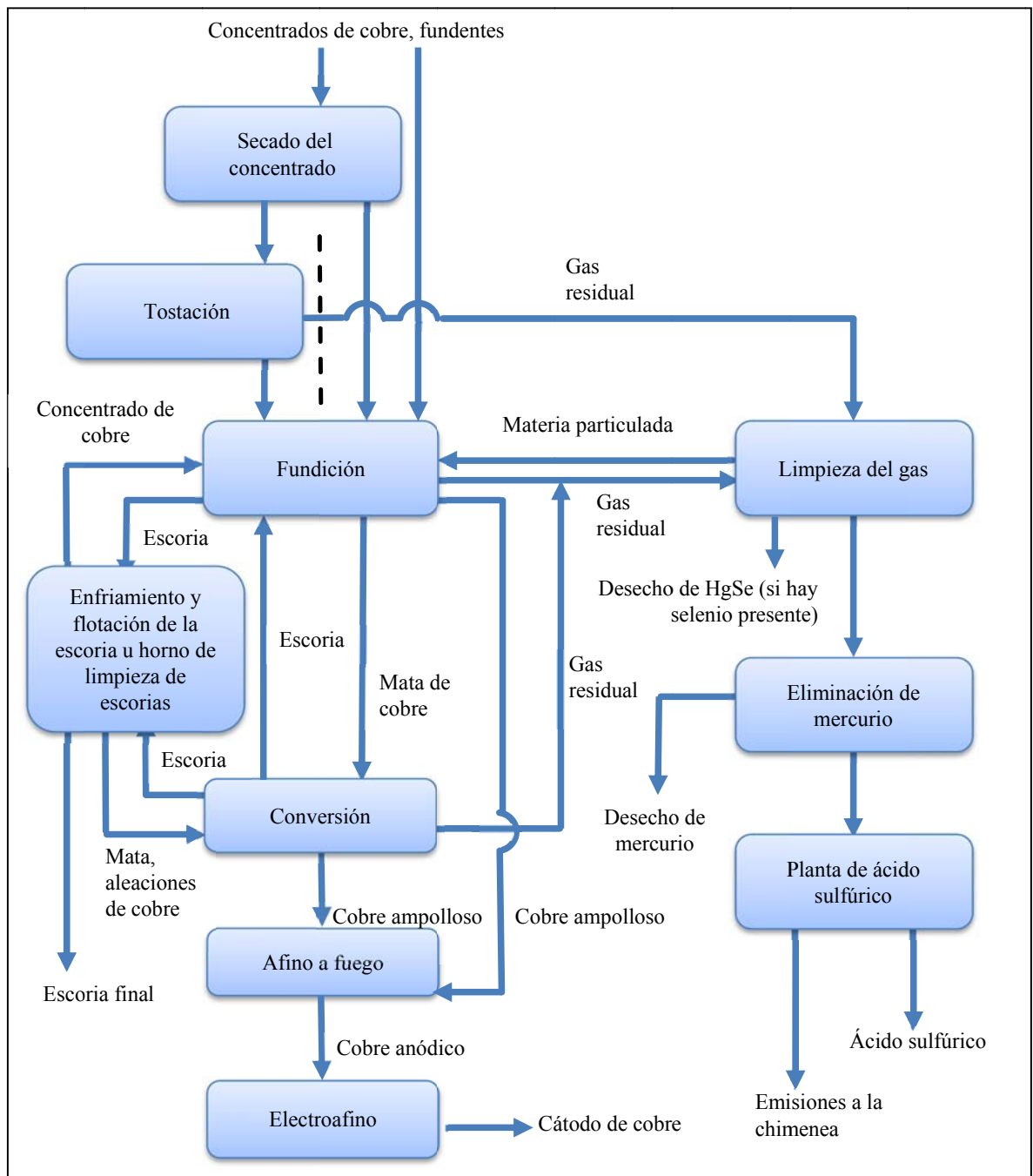


Figura 3: Procesos en la producción de cobre primario

2.4 Etapas del proceso de producción de oro

Algunos minerales auríferos en bruto requieren tratamiento antes de la lixiviación, mientras que otros se pueden lixiviar directamente. La presente sección se centrará en los minerales en bruto que requieren tostación como tratamiento previo a la lixiviación, por cuanto el anexo D del Convenio de Minamata incluye la tostación. En la figura 4 se ofrece una sinopsis de los procesos en cuestión.

2.4.1 Tostación

El mineral aurífero en bruto triturado, que generalmente contiene mercurio entre 0 y 100 ppm, se carga en un horno de tostación. Esos hornos funcionan a una temperatura entre 500°C y 600°C, y el calor se utiliza para oxidar el azufre y el carbón provenientes del mineral en bruto de manera que el oro se puede lixiviar y recuperar. Las temperaturas elevadas hacen que el mercurio contenido en el mineral en bruto se volatilice. Los gases resultantes del proceso de

tostación pasan por varias etapas de tratamiento, algunas de las cuales consisten en controles de contaminantes acompañantes, y también procesos específicos de la planta que se aplican para minimizar cuanto sea posible las emisiones de mercurio. Esos controles se describen más detalladamente en el estudio monográfico que se presenta aparte. Sobre la base de la experiencia obtenida en instalaciones con controles similares en operaciones comerciales existentes, cabe esperar que la eliminación total del mercurio proveniente del gas residual del horno de tostación sea superior a 99%.

2.4.2 Lixiviación

Se añade agua a la descarga del horno de tostación en un tanque agitador en el que el agua y los sólidos provenientes del horno de tostación se mezclan, creando una solución acuosa. Esta solución se envía a una serie de tanques en los que el oro se lixivia a partir de la solución –un circuito de carbón en lixiviación– utilizando cianuro. Una vez disueltos, desde la solución acuosa ambos compuestos de oro y mercurio se adsorben en carbón activado. La solución acuosa final, ahora agotada de oro y mercurio, se trata en un proceso de neutralización y detoxificación, y después se descarga en la instalación de embalse de relaves como desecho. El mercurio soluble en cianuro que permanece en la solución de relave resultante de la lixiviación contribuirá muy poco al mercurio atmosférico debido a que la presión de vapor del compuesto de mercurio y cianuro es muy baja.

2.4.3 Decapado y regeneración

El carbón cargado a partir del circuito de carbón en lixiviación se lava y se transfiere a un receptáculo en el que el oro y el mercurio se decapan del carbón de vuelta a la solución. Esto da por resultado una solución con un alto contenido de oro de la que este se puede extraer mediante electrodeposición o precipitación según se describe más adelante. Después de remover el oro del carbón (decapado), este se envía a un horno para su regeneración térmica y se recicla de vuelta a la etapa de lixiviación.

Cierta cantidad de mercurio permanece absorbido en el carbón decapado. El horno de regeneración del carbón consiste en un receptáculo cerrado que calienta el carbón a una temperatura superior a 700°C, lo cual lo deshidrata y le elimina cualquier mercurio absorbido haciendo que este pase a estado gaseoso. El receptáculo no contiene oxígeno y esto hace posible que el carbón se seque sin oxidarse o quemarse. El gas se expelle y enfría. El mercurio elemental se condensa y se colecta en matraces industriales estancos. La gestión de los materiales que contienen mercurio, que incluye el almacenamiento, la eliminación y el comercio, debe realizarse de conformidad con otros artículos pertinentes del Convenio.

El mercurio gaseoso remanente se hace pasar por un receptáculo que contiene carbón activado impregnado de azufre. El mercurio presente en el gas se une químicamente al azufre para formar un compuesto de cinabrio estable (sulfuro de mercurio (II)).

Sobre la base de la experiencia obtenida con controles similares en otras operaciones comerciales existentes, cabe esperar que la eliminación total del mercurio presente en el gas de escape del horno de regeneración sea superior a 99%. Si bien los hornos de regeneración de carbón no están incluidos en el alcance del anexo D del Convenio de Minamata, es importante señalar que, en los casos en que las emisiones no están sujetas a control, pueden constituir fuentes importantes de emisiones de mercurio.

2.4.4 Afino

El fango aurífero resultante de la electrodeposición o precipitación mediante polvo de zinc se filtra y después se procesa en una retorta. La retorta calienta el fango a más de 600°C para secar los sólidos y el mercurio remanente se elimina en el gas de escape. El gas de la retorta se expelle hacia un equipo de manipulación de gas para eliminar el mercurio antes de que el material aurífero se envíe al horno de afino. El gas de la retorta primeramente se enfría y condensa, y el mercurio se colecta en su forma elemental. Si queda mercurio sin condensar, se le hace pasar por un receptáculo que contiene carbón activado impregnado de azufre. El mercurio presente en el gas se une químicamente con el azufre para formar un compuesto estable de mineral de cinabrio. Sobre la base de la experiencia obtenida en una instalación con controles similares en una operación existente, cabe esperar que la eliminación del mercurio del gas de escape sea superior a 99%.

2.4.5 Horno

Los sólidos auríferos deshidratados provenientes de las retortas se calientan en un horno a temperaturas superiores a los puntos de fusión de todos los constituyentes de la carga para proporcionar la separación final del oro y las impurezas. Primeramente el gas de escape se hace pasar a través de una cámara de filtro de bolsa para eliminar cualquier materia particulada, incluido el mercurio unido a partículas. Después el gas de escape se hace pasar a través de un receptáculo que contiene carbón activado impregnado de azufre en el que el mercurio se une químicamente con el azufre para formar un compuesto estable de mineral de cinabrio. Sobre la base de la experiencia obtenida en instalaciones con controles similares en otras operaciones existentes, cabe esperar que la eliminación total de mercurio del gas de escape del horno sea superior a 99%. Los desechos que contienen mercurio se deben eliminar de manera ambientalmente racional. Con fines de aclaración, se señala que las emisiones resultantes del horno no están incluidas

en el anexo D del Convenio de Minamata. Además, es probable que los hornos no constituyan fuentes importantes de emisiones de mercurio.

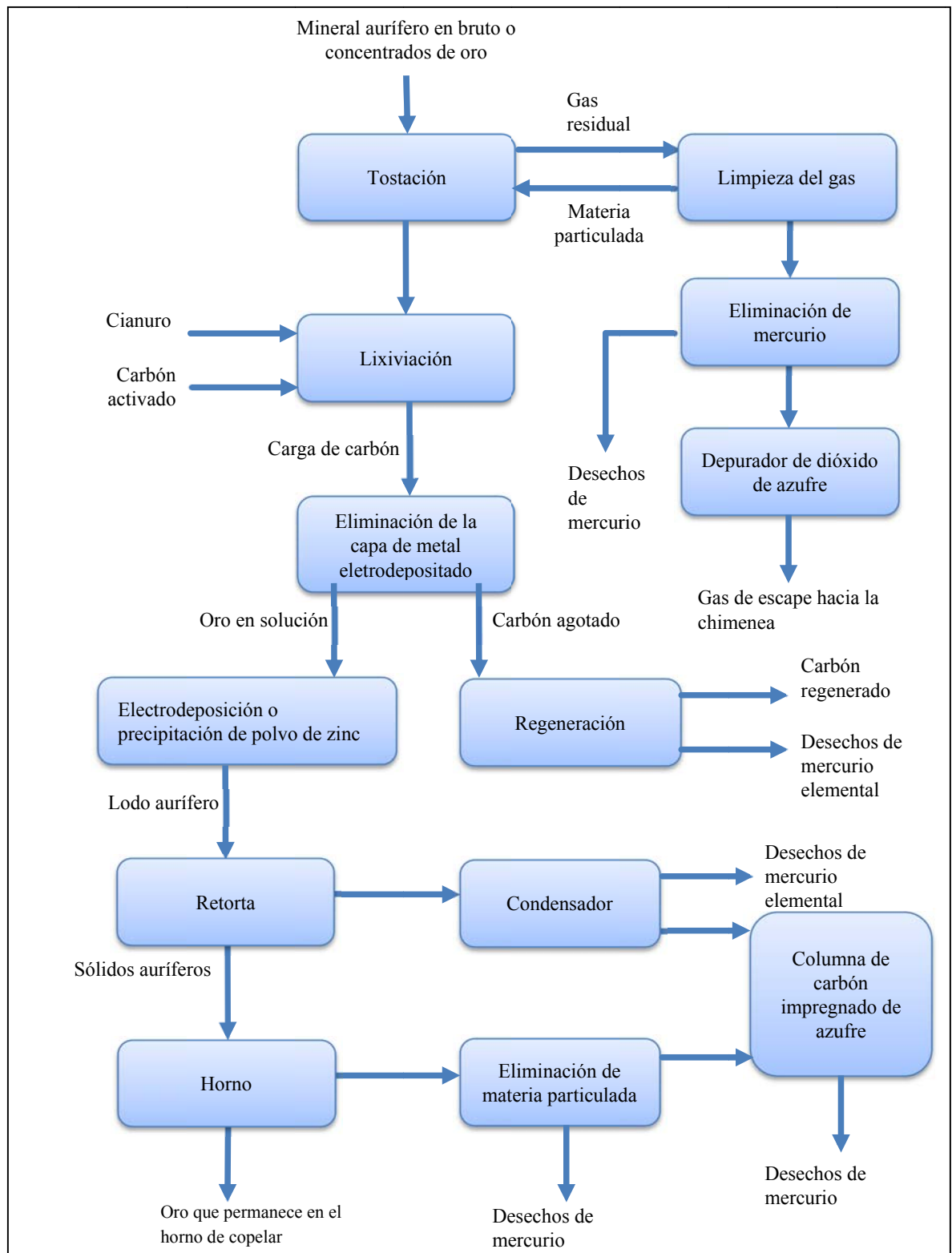


Figura 4: Procesos en la producción de oro primario

3 Técnicas de control de las emisiones

En las secciones que figuran a continuación, se describen las principales técnicas de reducción de las emisiones de mercurio a la atmósfera que se aplican en el sector de tostación, fundición y afino de metales no ferrosos. En sentido general, estas técnicas se basan en alguna forma de oxidación del mercurio y en las interacciones con materiales como el cloruro de mercurio (II). En esta lista no se incluyen las técnicas reconocidas que reducen las emisiones de mercurio a la atmósfera gracias al beneficio paralelo resultante de la captación de otros contaminantes, como son los compuestos orgánicos de carbono y otras partículas. También se muestra un diagrama de las tecnologías de control de múltiples contaminantes, que proporcionan un beneficio paralelo para la captación de las emisiones de mercurio.

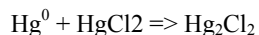
El mercurio es volátil a las temperaturas que se registran en la mayoría de los procesos de reducción, de ahí que tal vez sea necesario aplicar técnicas específicas de cada sector para eliminarlo. Cuando se va a eliminar el mercurio que se produce en una planta de ácido sulfúrico, todo mercurio residual estará presente en el ácido que se produce. La calidad del ácido a menudo se define en función de aspectos como su calidad comercial, su calidad técnica, su posible uso electrolítico, en baterías o acumuladores o en la industria alimenticia y demás. Estos aspectos son generales por naturaleza y pueden variar de un proveedor a otro y de un país a otro. La especificación del producto depende del posible uso del ácido y se tiene noticias de que lo común es que sea menos de 1,0 ppm y equivalente a ~0,02 mg/Nm³ en el gas limpio¹, aunque para algunas aplicaciones posiblemente se requieran concentraciones más bajas².

3.1 Proceso Boliden Norzink

3.1.1 Descripción

El proceso Boliden Norzink (llamado también proceso del depurador de cloro Outotec o proceso BN de Outotec³) elimina el mercurio elemental de los gases perdidos de los hornos de fundición del mineral en bruto primario mediante la conversión del mercurio en cloruro de mercurio (I), Hg₂Cl₂ (conocido también como “calomelano”). El calomelano es el resultado de la reacción del mercurio con el cloruro de mercurio (II), HgCl₂. El cloruro de mercurio (II) se recupera entonces de parte del calomelano mediante oxidación con cloro y se reincorpora al proceso de depuración de gases.

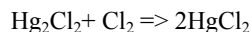
El proceso⁴ tiene lugar en una torre de lecho empacado. El mercurio elemental en estado de vapor contenido en los gases perdidos se oxida en el depurador por medio de una solución acuosa de cloruro de mercurio (II):



La torre consiste en una estructura cilíndrica reforzada de fibra de vidrio en forma de columna, por donde los gases perdidos ascienden desde el fondo. La torre se empaca con polipropileno (moldeado, por regla general, en forma de monturas). Por la parte superior de la torre se rocía la solución depuradora sobre el empaque a través de una serie de toberas. A la salida de la torre, una manga o almohadilla de malla, que sirve para eliminar el rocío, impide que la solución depuradora escape del sistema. La temperatura del proceso es de alrededor de 40°C o menos y la caída de presión en la torre del depurador registra cerca de 1 kPa.

El calomelano resultante es insoluble. Se precipita de la solución y se elimina en el fondo de la torre en forma de suspensión acuosa espesa. La solución vuelve a circular entonces hacia el depurador. En las condiciones de un proceso optimizado, el mercurio elemental reacciona casi completamente con el cloruro de mercurio (II).

Es necesario mantener una alta concentración de cloruro de mercurio (II) en la solución depuradora circulante para lograr una oxidación eficaz. Por esa razón, la mitad de la suspensión acuosa se trata con gas de cloro para volver a oxidar el cloruro de mercurio (I) que se precipita en cloruro de mercurio (II):



Tan pronto como la solución de calomelano tratada se ha regenerado del todo, se bombea a un tanque de almacenamiento. Cuando la concentración de cloruro de mercurio (II) se agota en el circuito de depuración, la solución de cloruro de mercurio (II) regenerado se extrae del tanque y se añade para mantener la concentración de cloruro de mercurio (II) en el circuito de depuración.

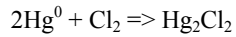
¹ www.mercuryconvention.org/Portals/11/.../EG1/EU_information.pdf; consultado el 24 de marzo de 2015.

² http://www.sulphuric-acid.com/techmanual/Properties/properties_acid_quality.htm; consultado el 24 de marzo de 2015.

³ <http://www.outotec.com/en/About-us/Our-technologies/Gas-cleaning/Mercury-removal/#tabid-2>. Consultado el 24 de marzo de 2015

⁴ http://www.sulphuric-acid.com/techmanual/GasCleaning/gcl_hg.htm; consultado el 24 de marzo de 2015.

La reacción neta de los pasos a) y b) del proceso es:



La mitad restante de la suspensión acuosa de calomelano se envía a un tanque sedimentador. La solución aclarada se desborda y regresa al tanque de bombeo de la torre de depuración. En el fondo del tanque sedimentador, el cloruro de mercurio (I) insoluble se asienta en un tanque cónico. Los sólidos pasan a un segundo tanque sedimentador para seguir concentrándose. Se puede añadir polvo de zinc para coadyuvar a la precipitación. Los sólidos que se obtienen del segundo tanque sedimentador se almacenan en bidones para la venta o para usarlos en el procesamiento interno en otro momento. Por último, el calomelano purgado se puede eliminar o se puede usar para la producción de mercurio elemental. El mercurio es almacenado entonces en contenedores herméticos. En la

Figura 5 se muestra un diagrama del proceso Boliden Norzink.

Se deben tomar en consideración los riesgos que entraña para la salud de los trabajadores su posible exposición al cloruro de mercurio (II) o al cloro (que son muy tóxicos).

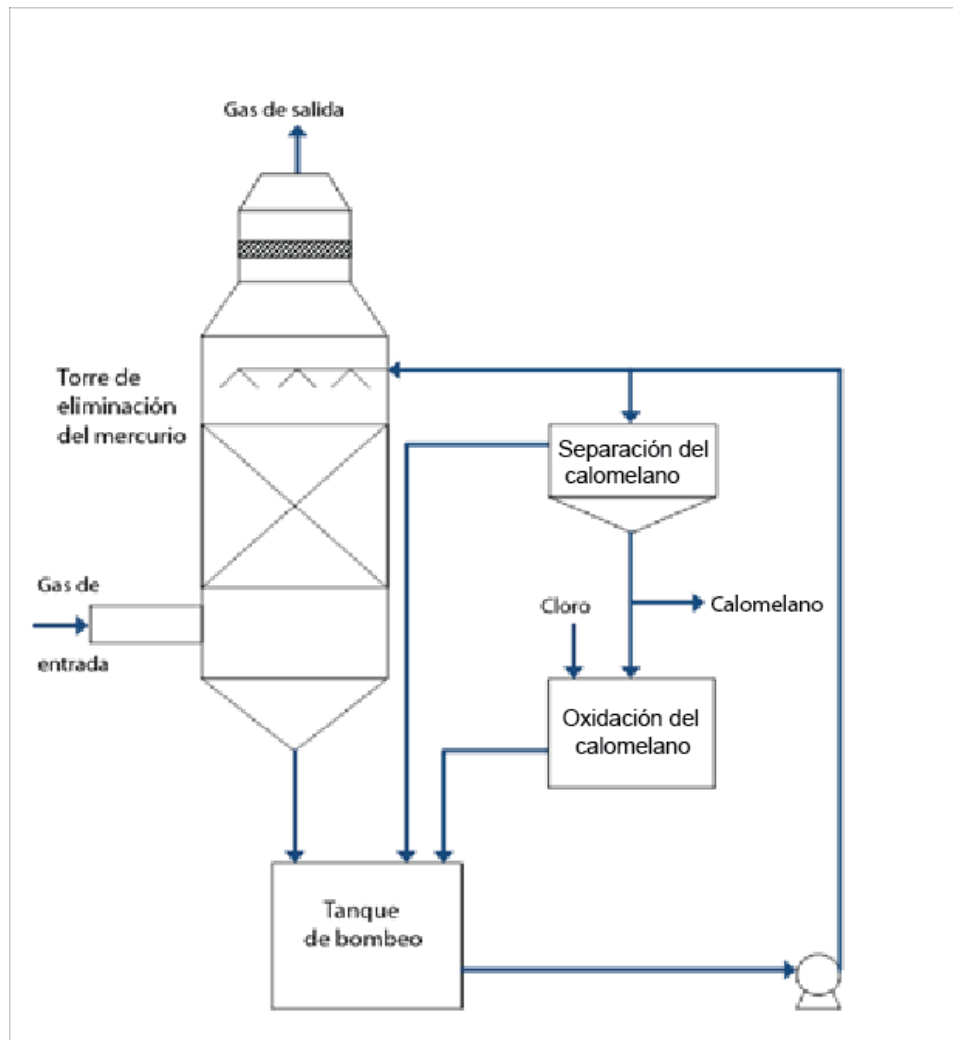


Figura 5: Diagrama del proceso Boliden Norzink para la recuperación de Hg_2Cl_2 (Hultbom 2003)

3.1.2 Aplicabilidad

Este procedimiento es aplicable a todos los gases de proceso de los hornos de fundición de minerales, en particular en el caso de gases de proceso que contengan SO_2 . La técnica es eficaz para diversos niveles de suministro de mercurio y también para un alto contenido de mercurio y se usa con eficacia en cerca de 40 plantas en todo el mundo.

3.1.3 Eficacia

La eficacia de eliminación depende del contenido de mercurio de los gases perdidos que entran y que suele ser del 99,7%. La concentración típica del mercurio de salida es de 0,3 a 0,5 ppm⁵ (Hultbom 2003; CEPE 2013). También se logra una concentración de salida de 0,3 a 0,5 ppm, cuando las concentraciones de mercurio de entrada son altas, de más de 100 mg/Nm³ (Hultbom 2003)⁶.

Cuadro 3

Eficacia del proceso Boliden Norzink en Boliden Rönnskar⁷ (BREF NFM 2014)

Flujo de gas 30.000 Nm ³ /h	Antes [μg/Nm ³]	Después [μg/Nm ³]	Eficacia de reducción [%]
Alta concentración de entrada	9879	30	99,7
Baja concentración de entrada	51	13	74

3.1.4 Efectos recíprocos entre los distintos medios

Los efectos recíprocos entre los distintos medios de este proceso son los siguientes:

- Efectos en la atmósfera y el agua debidos a la producción de desechos de calomelano sólido, mediante lixiviación o vaporización del mercurio.

3.1.5 Gastos de instalación y funcionamiento

Para la construcción se utilizan fundamentalmente materiales plásticos, debido a la baja temperatura del proceso (menos de 40°C).

Los gastos de funcionamiento son bajos porque se limitan al:

- Consumo de energía eléctrica de las bombas de circulación;
- Aumento del consumo de energía eléctrica de los ventiladores a fin de compensar la caída de presión creada por la torre de depuración;
- Consumo de gas de cloro para la recuperación de cloruro de mercurio (II).

Los gastos de funcionamiento son prácticamente independientes del nivel de mercurio en el gas de escape⁷ (Hultbom 2003), por lo que se considera que el proceso es económicamente viable. En Aurubis Hamburg, los costos de inversión de la instalación de la planta de eliminación de mercurio ascendieron a 5 millones de euros (condensador, calentadores, filtro de bolsas, sistema de inyección, torre de absorción y ventiladores incluidos) (BREF NFM 2014).

3.2 Filtro de selenio

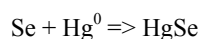
3.2.1 Descripción

El proceso de filtro de selenio^{37,38} elimina el bajo contenido de mercurio elemental de los gases perdidos de los hornos de fundición de mineral en bruto primario mediante la conversión del ácido selénico en selenio rojo amorfo, que reacciona con el mercurio en estado gaseoso para formar seleniuro de mercurio (II).

El filtro de selenio es un filtro de lecho fijo con una gran superficie, diseñado para lograr contacto total con la sustancia activa. Se usa un material poroso inerte parecido al soporte de un catalizador. Este material se impregna con el selenio rojo amorfo. La impregnación se logra secando la solución de ácido selénico en presencia de SO₂ para precipitar selenio rojo amorfo:



El selenio rojo amorfo reacciona con el mercurio presente en los gases para formar seleniuro de mercurio (II):



El tiempo de contacto en el filtro es de aproximadamente 1 a 3 segundos.

El filtro mantiene su eficacia hasta que el nivel de mercurio en el filtro alcanza del 10% al 15%. En ese momento, el filtro se somete a tratamiento para recuperar el mercurio y regenerar el selenio.

⁵ <http://www.outotec.com/en/About-us/Our-technologies/Gas-cleaning/Mercury-removal/>; consultado el 24 de marzo de 2015.

⁶ Nm³ es un metro cúbico normal y se refiere al gas medido a una presión de 1 atmósfera y una temperatura de 0°C.

⁷ Comisión Económica para Europa, Protocolo sobre metales pesados, se puede consultar en: http://www.unece.org/env/lrtap/hm_h1.html; consultado el 24 de marzo de 2015.

La presión de vapor del mercurio a temperaturas entre 0°C y 100°C es muy baja en comparación con el HgSe. Como sustancia de control, el selenio es muy conveniente porque su presión de vapor también es muy baja a esas temperaturas, y la pérdida de selenio es menor. Los filtros pueden funcionar a temperaturas de hasta 110°C con gases saturados de vapor de agua. Sin embargo, debe evitarse la condensación dentro de los filtros.

La caída de presión es del orden de 600 Pa para un filtro de una etapa con un período de retención de tres segundos.

El filtro de selenio puede producir gases perdidos que prácticamente no contienen mercurio en los hornos de fundición. También se puede aplicar como segunda etapa en el tratamiento de los gases perdidos para disminuir el contenido de mercurio antes de que el gas entre posteriormente a una planta de ácido que produce ácidos sin mercurio.

Comparado con otros adsorbentes de mercurio de lecho fijo, como el carbón activado, el filtro de selenio tiene la ventaja de reaccionar selectivamente con el mercurio. No se producirán reacciones colaterales indeseadas debido a que a la masa de selenio no se le conoce actividad catalítica alguna. Esto posibilita, por ejemplo, usar el filtro de selenio para eliminar el mercurio en gases húmedos que contengan SO₂. Con el carbón activado, el SO₂ se oxida en SO₃, lo que al combinarse con vapor de agua forma ácido sulfúrico, que obstruye el filtro (Hultbom 2003).

Para lograr concentraciones de mercurio de 0,05 mg/Nm³ o menos, otra posibilidad sería un enfriamiento extremo del gas a niveles de temperatura muy por debajo de 0°C para separar los compuestos de mercurio en forma de partículas y el mercurio en estado líquido. El mismo nivel residual se puede lograr captando el mercurio como seleniuro de mercurio (II) (HgSe) a temperaturas de hasta aproximadamente 140°C (Hultbom 2003).

3.2.2 Aplicabilidad

La aplicabilidad ha quedado demostrada en al menos seis plantas en todo el mundo.

3.2.3 Grado de eficacia

La eficacia de eliminación depende del tiempo de retención. Para lograr eficacias de eliminación del 95%, por regla general, hace falta un período de retención de tres segundos (Hultbom 2003). Lo habitual es que se logren eficacias de eliminación del 90% **Error! Bookmark not defined.** La concentración mínima media del mercurio de salida prevista por hora⁷ es de menos de 0,01 mg/Nm³ (CEPE, Protocolo sobre metales pesados, 2013). En los cuadros que figuran a continuación se muestran algunas reducciones típicas del mercurio.

Cuadro 4

Eficacia del proceso con filtro de selenio en Boliden Rönnskär⁷ (horno de fundición de cobre, plomo y zinc) (BREF NFM 2014)

Flujo de gas 80.000 Nm ³ /h	Antes [µg/Nm ³]	Después [µg/Nm ³]	Eficacia de reducción [%]
Alta concentración de entrada	1008	48	95
Baja concentración de entrada	42	12	71

Cuadro 1

Resultados típicos del proceso con filtro de selenio (Hultbom 2003)

Flujo de gas	Antes [µg/Nm ³]	Después [µg/Nm ³]	Eficacia de reducción [%]
Alta concentración de entrada	6000	<50	99

3.2.4 Gastos de instalación y funcionamiento

El costo de inversión es proporcional a la cantidad de flujo de gas.

Cuando la masa de selenio queda saturada con mercurio, hay que sustituirla, lo que representa el gasto principal para esta tecnología, que, en lo esencial, es proporcional a la cantidad de mercurio desechada (Hultbom 2003).

Los gastos de instalación del filtro de selenio suelen ser análogos a los del proceso Boliden Norzink cuando esa tecnología resulta ser la más apropiada. A magnitudes de flujo de gas más bajas, el costo relativo de la inversión es inferior al del proceso Boliden Norzink, debido a que el método de depuración es el que requiere más equipo. En cambio, ocurre lo contrario cuando la magnitud del flujo es mayor debido a que el costo de ampliación a escala de un depurador es menor que el de un filtro de lecho fijo (Hultbom 2003).

En el caso de magnitudes de flujo de gas más altas con niveles de entrada de mercurio más altos, el proceso Boliden Norzink es el más económico; no obstante, se ha informado de la posibilidad de combinar el proceso Boliden Norzink con el de filtro de selenio (Hultbom 2003) a fin de cumplir requisitos más estrictos en relación con la eliminación del mercurio.

Fuentes de la industria informan de costos indicativos cercanos a los 3 millones de euros como inversión inicial para un filtro de selenio con una capacidad de 200.000 m³/h, más 70 toneladas de selenio a un precio de 35.000 euros por tonelada.

3.2.5 Efectos recíprocos entre los distintos medios

Posiblemente se produzcan efectos en la atmósfera y el agua debido a la vaporización de mercurio elemental o al mercurio oxidado causado por la producción de desechos de seleniuro de mercurio (II) sólido. Es necesario estabilizar esos desechos antes de proseguir con el tratamiento. La gestión de los materiales que contienen mercurio, en particular el almacenamiento, la eliminación y el comercio, debe llevarse a cabo conforme a lo dispuesto en los demás artículos pertinentes del Convenio.

3.3 Carbón activado

3.3.1 Descripción

El carbón activado impregnado de azufre⁸ es una tecnología comprobada que se emplea en el sector industrial del oro para controlar las emisiones a la atmósfera. El carbón activado se puede aplicar tanto en un dispositivo de lecho fijo como mediante inyección de carbón. El mercurio contenido en las emisiones de gases reacciona con el carbón impregnado de azufre a medida que los gases pasan por el lecho para formar sulfuro mercúrico (II) (HgS). El carbón activado tiene la ventaja de eliminar todos los tipos de mercurio de las emisiones a la atmósfera, entre ellos el mercurio oxidado, el mercurio ligado a partículas y el mercurio elemental.

Esta tecnología de control capta el mercurio como sulfuro mercúrico (HgS) estable absorbido en el carbón activo impregnado de azufre. El desarrollo de esta tecnología se encuentra en un estado avanzado; se trata de una tecnología reconocida cuyo empleo se ha generalizado en el sector de la metalurgia no ferrosa, y se aplica mayoritariamente en el sector de extracción de oro, además de emplearse también con otros metales. También tiene aplicaciones en la industria eléctrica.

Cuando una fuente usa carbón activado, tiene que vencer algunas limitaciones. En primer lugar, las temperaturas máximas de uso varían según el fabricante. Es posible que haya que enfriar previamente el flujo de gases. En segundo lugar, si el flujo de gases tiene una humedad superior al 10%, es indispensable someterlo a tratamiento previo para reducir la humedad. Por último, existe el riesgo de incendio debido al empleo de carbón activado como medio de control del mercurio; no obstante, durante años, un gran número de instalaciones ha estado utilizando carbón activado sin que se hayan producido incidentes. Con un tratamiento adecuado, estos riesgos se pueden atenuar y reducir al mínimo.

3.3.2 Aplicabilidad

El carbón activado se puede utilizar para eliminar todas las formas de mercurio de las emisiones: en estado gaseoso y en partículas, elemental y oxidado. El carbón activado puede adsorber entre 10% y 40% de mercurio por peso antes de que sea necesario sustituirlo. Además, el carbón impregnado de azufre (15% a 20% por peso) es eficaz en la formación de un sorbente estable.

3.3.3 Grado de eficacia

Un sistema de adsorción a base de carbón impregnado de azufre debidamente diseñado y mantenido, instalado a la salida de un condensador, es capaz de captar 99% del mercurio y lograr una concentración de 0,01 mg/m³. Las especificaciones de adsorción de mercurio de los fabricantes de carbón varían de 10% a 40%. Ahora bien, el carbón se suele cargar con mercurio hasta un 20% por peso antes de ser sustituido. El adsorbente agotado se elimina como desecho peligroso o se destila en retortas para recuperar el mercurio elemental. La gestión de los materiales que contienen mercurio, en particular el almacenamiento, la eliminación y el comercio, debe llevarse a cabo conforme a lo dispuesto en los demás artículos pertinentes del Convenio.

3.3.4 Gastos de instalación y funcionamiento

Un factor que incide en los gastos de instalación es la magnitud del flujo volumétrico del gas que va a ser tratado. En la Figura 6 se muestran los gastos de equipo y materiales para un sistema que utilice carbón y que conste de depuración, enfriamiento, condensación y lechos de adsorción. No se incluye el costo de construcción ni la instalación a causa de la variabilidad implícita en las condiciones geográficas y la complejidad de los proyectos de que se trate.

⁸ Existen otros tipos de carbón activado, entre ellos el carbón activado impregnado de halógeno, fluoruro, yodo o bromo, que también se están empleando para el control del mercurio, pero no está claro si el sector de la metalurgia no ferrosa está empleando activamente estos tipos de carbón activado. Posiblemente sea más apropiado analizar estos tipos en nuestra sección sobre nuevas tecnologías. Por esa razón, el presente capítulo se centra en el carbón impregnado de azufre.

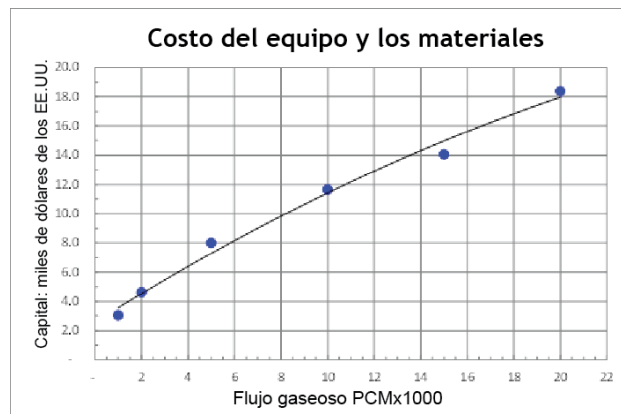


Figura 6: Gastos de instalación del equipo y los materiales en el caso de filtros de carbón activado impregnados de azufre como función del flujo de gas (PCM: pies cúbicos por minuto, 1 PCM = 1,7 m³/hora)

El principal gasto de funcionamiento es la sustitución y eliminación o destilación en retortas del carbón activado impregnado de azufre ya agotado. La tasa de sustitución depende del contenido de mercurio en el flujo de gas. El costo de sustitución del carbón impregnado de azufre en América del Norte es de 6,6 dólares/kg.

3.3.5 Beneficios paralelos

El carbón activado que no está impregnado de azufre es muy eficaz para eliminar compuestos orgánicos, como dioxinas o furanos y compuestos orgánicos volátiles contenidos en el flujo de gas. En presencia de compuestos orgánicos, es común instalar lo que se conoce como “lecho de limpieza previa mediante carbón activado” para eliminarlos antes que el lecho impregnado de azufre haga lo mismo con el mercurio. Sin ese lecho de limpieza previa, los compuestos orgánicos serían adsorbidos por el carbón impregnado de azufre, lo que reduciría la capacidad de eliminación posterior del mercurio y aumentaría los gastos que ocasiona tener que sustituir el lecho con más frecuencia (Krumins *et al.* 2013).

3.3.6 Efectos recíprocos entre los distintos medios

Posiblemente sea necesario eliminar el carbón impregnado de azufre y cargado de mercurio como desecho peligroso. La gestión de los materiales que contienen mercurio, en particular el almacenamiento, la eliminación y el comercio, debe llevarse a cabo conforme a lo dispuesto en los demás artículos pertinentes del Convenio.

3.4 Proceso de filtración DOWA (filtro de piedra pómez recubierto de sulfuro de plomo (II))

El proceso a base de sulfuro de plomo (II) es una técnica de medio seco usada para eliminar el mercurio de los gases de combustión generados en los hornos de fundición de metales no ferrosos. Los gases que contienen mercurio volátil ascienden por una torre rellena de bolas recubiertas de sulfuro de plomo, como son las de piedra pómez granuladas, para que el contacto con el gas sea eficaz. El mercurio, que tiene una alta presión de vapor, al entrar en contacto con el gas, que contiene sulfuro de plomo (II), se convierte en sulfuro mercúrico, cuya presión de vapor es muy baja. Para el proceso a base de sulfuro de plomo (II), se ha medido una eficacia de eliminación del mercurio del 99%, lo que da por resultado concentraciones de las emisiones de mercurio de 0,01 a 0,05 mg/Nm³.

Fuentes de la industria han comunicado los costos indicativos: una torre Dowa con una capacidad de 200.000 m³/h de gas tiene un costo de inversión inicial de cerca de 5,5 millones de euros, más el costo de 500m³ de los materiales del filtro a un costo de 1.800 euros por tonelada, cuya vida útil es de aproximadamente 5 a 10 años.

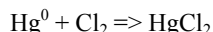
3.5 Proceso Jerritt

3.5.1 Descripción

El proceso Jerritt se está empleando actualmente en una mina de oro, como se muestra en la figura 8. El proceso elimina mercurio elemental de los gases perdidos de los hornos de tostación mediante la conversión del mercurio en cloruro de mercurio (II), HgCl₂. El cloruro de mercurio (II) es el resultado de la reacción del mercurio con el cloro (Cl₂) disuelto. A continuación, mediante deposición electrolítica directa, se recupera mercurio elemental de la purga de gases que contienen cloruro de mercurio (II), que se tratan con polvo de zinc a fin de precipitar cloruro de mercurio (I) o se devuelven al tanque de sedimentación para recuperar cualquier valor oro que haya quedado.

El proceso Jerritt fue creado e instalado por primera vez en 2009 por la firma canadiense Yukon-Nevada Gold Corporation en su planta de tostación de mineral en bruto de Jerritt Canyon (Elko, Nevada (Estados Unidos)). Más tarde, en 2010, el sistema fue instalado en su secadero de mineral.

El proceso tiene lugar en una torre de lecho empacado. El mercurio elemental en estado de vapor contenido en los gases perdidos se oxida mediante una solución acuosa, en la que se disuelve el cloro para la depuración:



La torre consiste en una estructura cilíndrica de fibra de vidrio reforzada en forma de columna, por donde ascienden los gases perdidos desde el fondo. El fondo de la torre se rellena con un empaque de polipropileno en forma de montura. Por la parte superior de la torre se rocía la solución depuradora sobre el empaque por medio de un conjunto de toberas.

A la salida de la torre se coloca una manga o almohadilla de malla que impide que la solución depuradora escape del sistema. La temperatura del proceso es de unos 40°C o menos y la caída de presión en la torre depuradora, aproximadamente 1 kPa.

La solución retorna al depurador y de esta solución que recircula, se purga un cantidad equivalente al volumen de la solución que controla el pH y el rocío separador de partículas. En las condiciones de un proceso optimizado, el mercurio elemental reacciona casi completamente con el cloro disuelto.

Se debe tomar en consideración también el riesgo que supone para la salud de los trabajadores su posible exposición al cloruro de mercurio (II) (que es muy tóxico).

3.5.2 Aplicabilidad

Este proceso es aplicable a todos los gases perdidos dimanantes de los hornos de tostación, en particular en el caso de gases perdidos de los que se haya eliminado SO₂ mediante depuración. La técnica es eficaz para altos niveles de admisión de mercurio como ocurre en los hornos de tostación Jerritt y también cuando los niveles de admisión de mercurio son bajos, como es el caso de los secaderos Jerritt de mineral en bruto.

3.5.3 Eficacia

La eficacia de eliminación suele ser del 99,97%. La concentración típica de salida del mercurio es de 0,004 a 0,005 ppm.

3.5.4 Efectos recíprocos entre los distintos medios

Los efectos recíprocos entre los distintos medios de este proceso son:

- Efectos en la atmósfera y el agua debidos a la producción de desechos de calomelano sólido (que se pueden evitar si se aplica la deposición electrolítica al cloruro de mercurio (II) o si el material purgado del depurador se elimina en el tanque de sedimentación del horno de tostación).

3.5.5 Gastos de instalación y funcionamiento

Debido a que el proceso tiene lugar a baja temperatura (menos de 40°C), para la construcción se utilizan fundamentalmente materiales plásticos.

Los gastos de funcionamiento son bajos porque se limitan al:

- Consumo de energía eléctrica para las bombas de circulación;
- Aumento del consumo de energía eléctrica para los ventiladores a fin de compensar la caída de presión creada por la torre del depurador;
- Consumo de gas de cloro.

Los gastos de funcionamiento son prácticamente independientes del nivel de mercurio presente en los gases perdidos.

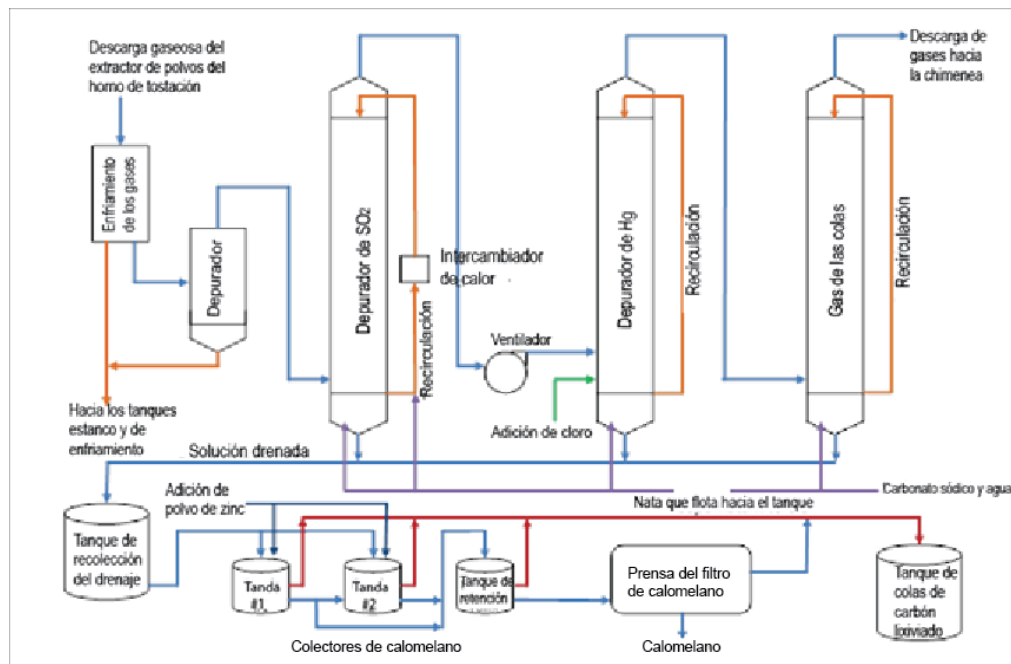


Figura 7: Diagrama del proceso Jerritt con opción de recuperación de Hg_2Cl_2

3.6 Beneficios paralelos de las tecnologías comunes y las plantas de ácido para la reducción de la contaminación atmosférica en el control del mercurio

3.6.1 Tecnologías de reducción de la contaminación

En el capítulo sobre técnicas comunes del documento de orientación sobre mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales figura una sección de temas de interés general sobre tecnologías comunes de reducción de la contaminación, en la que se describe un beneficio paralelo para la captación de emisiones de mercurio. En la presente sección se analiza la aplicabilidad de esas técnicas al sector de metales no ferrosos.

3.6.1.1 Filtros de bolsa

El uso de filtros de bolsa es común en el sector de metales no ferrosos debido a que esta técnica proporciona la máxima eficacia de recolección entre los métodos de control de partículas. La torta de polvo que recogen los filtros se puede sacar periódicamente utilizando métodos como reversión de la corriente de aire, sacudida mecánica, vibración e impulsión del aire. La torta de polvo se puede reciclar entonces en el proceso del horno de fundición para recuperar cualquier metal de valor que contenga. Esta técnica es eficaz para captar mercurio en forma de partículas o mercurio que haya sido adsorbido en partículas.

3.6.1.2 Precipitadores electrostáticos

En el sector de la metalurgia no ferrosa se usan mucho los precipitadores electrostáticos tanto húmedos como secos como primera etapa de eliminación de partículas. En los precipitadores electrostáticos secos, el polvo que se recoge en las placas cargadas se elimina mediante golpeo o vibración. Ese polvo se suele reciclar en el proceso del horno de fundición.

En los precipitadores electrostáticos húmedos, el polvo se elimina enjuagando las placas, usualmente con agua. Se produce un efluente y lodos, que se pueden reciclar en el proceso, si contienen materiales valiosos, o se pueden eliminar. En determinadas circunstancias, ha quedado demostrado que los precipitadores electrostáticos húmedos son eficaces para eliminar el mercurio tanto en estado gaseoso como en partículas, cuando se utilizan en combinación con otras técnicas, como los depuradores y los enfriadores de gases.

3.6.1.3 Depuradores

En el sector de la metalurgia no ferrosa se utilizan, por regla general, los depuradores húmedos, como en el caso de los gases de enfriamiento y la eliminación de partículas e impurezas, en particular el SO_3 , el HCl y el HF que forman parte del proceso de limpieza de gases antes de la producción de ácido sulfúrico. Esta técnica produce un efluente y lodos. El efluente se puede utilizar nuevamente en el depurador, mientras que los lodos se pueden reciclar en el proceso de fundición o se pueden eliminar. La gestión de los materiales que contienen mercurio, en particular el

almacenamiento, la eliminación y el comercio, debe llevarse a cabo conforme a lo dispuesto en los demás artículos pertinentes del Convenio.

Los depuradores húmedos son eficaces para eliminar el mercurio en forma de partículas o el mercurio que ha sido adsorbido en partículas. Sin embargo, los depuradores húmedos no son muy eficaces para eliminar del flujo de gas el mercurio elemental en estado gaseoso, a menos que contenga compuestos de selenio.

3.6.2 Depuración de gases combinada con plantas de ácido

3.6.2.1 Descripción

La combinación del equipo de depuración de gases con una planta de ácido sulfúrico es una tecnología comprobada para el control de las emisiones de azufre en la industria de metales no ferrosos y es de uso común en todo el mundo. En determinadas condiciones, el funcionamiento de una planta de ácido dotada de un equipo de depuración de gases ha demostrado también su eficacia en la captación del mercurio presente en el flujo de gas mediante el uso de técnicas tradicionales de control de partículas que revelan una eficacia de eliminación del mercurio equivalente al uso de alguna de las mejores técnicas disponibles específica. En estos casos, cuando las propiedades del mineral en bruto y las condiciones del proceso lo permiten, prácticamente todo el mercurio se elimina al depurar los gases antes de pasar a la planta de ácido y el mercurio residual se elimina de la depuración adicional de los gases después de que los materiales se envían a la planta de ácido.

En un estudio reciente⁹ completado en el Japón, quedó demostrado que muchas empresas están dependiendo más de las depuradoras de gases y las plantas de ácido para eliminar el mercurio de los gases de combustión en las instalaciones de fundición de metales. En el estudio se demostró la eficacia con que se está captando el mercurio mediante el uso de este método en determinados hornos de fundición de cobre, plomo y zinc.

3.6.2.2 Aplicabilidad

La combinación de plantas de ácido sulfúrico con la depuración de gases que eliminan con eficacia el mercurio se ha estado utilizando en todo el mundo en los hornos de fundición de cobre, zinc y plomo.

En un estudio exhaustivo llevado a cabo en el Japón (Takaoka *et al.* 2012), se puso como ejemplo de ese tipo de planta un horno de fundición de zinc de Imperial Smelting Process (ISP), en el que se empleó un balance de materia del mercurio de carácter general, como se muestra en la Nota explicativa: PES: precipitador electrostático seco, DV: depurador Venturi, GC: enfriador de gases, WEP: precipitador electrostático húmedo, TD: torre de deshidratación, CTA: proceso de conversión y torre de absorción, DH: depurador húmedo

Figura 8: Balance de materia del mercurio respecto de la producción de ácido sulfúrico en la planta de zinc ISP del Japón (Takaoka *et al.* 2012)

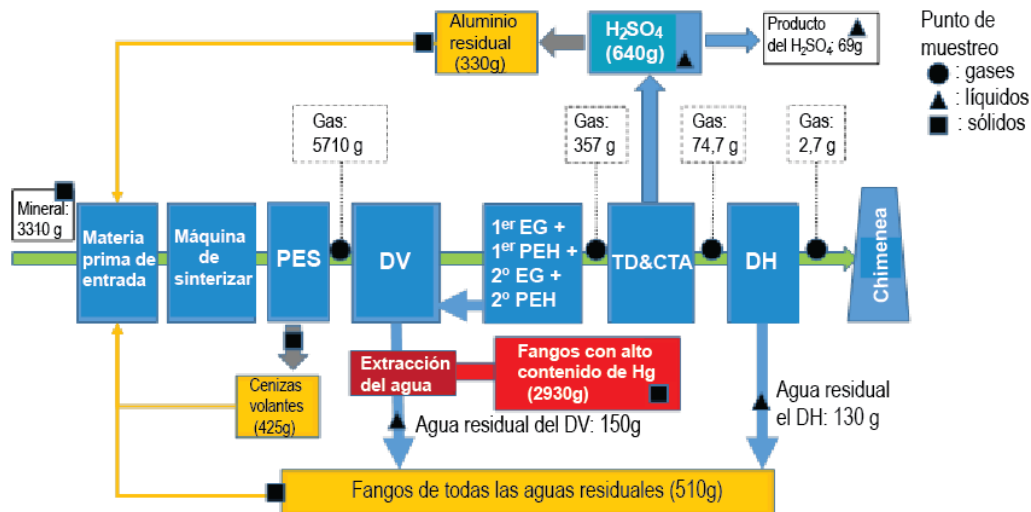
3.6.2.3 Grado de eficacia

Los resultados del estudio realizado en el Japón demuestran la posible eficacia de combinar la depuración de gases con el método de la planta de ácido sulfúrico en la captación del mercurio. Se determinó que la concentración total de mercurio en los gases de combustión era del orden de entre 1,7 y 6,1 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ (Takaoka *et al.* 2012).

3.6.2.4 Costos

La combinación de la depuración de gases y las plantas de ácido sulfúrico es una tecnología estándar para la extracción de dióxido de azufre de los gases de combustión en los hornos de fundición que procesan concentrados sulfídicos. En caso de poder recuperar el mercurio mediante esta combinación de tecnologías con una eficacia equivalente al uso de las mejores técnicas disponibles específicas del mercurio, no habría que invertir capital adicional para eliminarlo.

⁹ [JMIA bulletin “Kozan (<http://www.mmf.or.jp/>)” for the April 2015] Takashi Shimizu: Mercury Removal from the Nonferrous Smelter’s Off-gas in Japan.



Nota explicativa: PES: precipitador electrostático seco, DV: depurador Venturi, GC: enfriador de gases, WEP: precipitador electrostático húmedo, TD: torre de deshidratación, CTA: proceso de conversión y torre de absorción, DH: depurador húmedo

Figura 8: Balance de materia del mercurio respecto de la producción de ácido sulfúrico en la planta de zinc ISP del Japón (Takaoka et al. 2012)

3.6.2.5 Beneficios paralelos

Combinar la depuración de gases con una planta de ácido sulfúrico resulta muy eficaz para captar dióxido de azufre. De hecho, el objetivo primordial de instalar una planta de ácido sulfúrico es la captación de dióxido de azufre y la producción de ácido sulfúrico para la venta.

3.6.2.6 Efectos recíprocos entre los distintos medios

La producción de desechos sólidos de mercurio (fangos) posiblemente surta efectos en la atmósfera y el agua. La gestión de los materiales que contienen mercurio, en particular el almacenamiento, la eliminación y el comercio, debe llevarse a cabo conforme a lo dispuesto en los demás artículos pertinentes del Convenio.

4. Mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales

4.1 Sinopsis de las mejores técnicas disponibles

En el Cuadro figura una sinopsis de las técnicas que podrían tomarse en consideración al seleccionar las mejores técnicas disponibles para la reducción del mercurio en el sector de la metalurgia no ferrosa. Como se explica en la sección 3.6, gracias a los beneficios paralelos de la aplicación de las técnicas de reducción de la contaminación por gases y partículas y las plantas de ácido se pueden lograr emisiones de mercurio bajas, que sean aceptables.

Cuadro 5: Sinopsis de las técnicas de control específicas del mercurio para procesos de tostación y fundición de metales no ferrosos (se muestra el comportamiento típico de las emisiones, que tal vez no demuestre todas las situaciones posibles)^{38,41}(CEPE 2013)

Técnica de control del mercurio	Descripción	Eficacia típica (Eficacia de eliminación del mercurio) ^a	Ventajas/observaciones	Desventajas
Boliden-Norzink	Se basa en un depurador húmedo que usa la reacción entre el cloruro de mercurio (II) y el mercurio para formar cloruro de mercurio (I) (calomelano), que se precipita de la solución.	99,7% – concentración de entrada de ~ 9900 µg/m ³ 74% – concentración de entrada de 51 µg/m ³	Ampliamente demostradas	Manipulación de gas de cloro Manipulación de calomelano Eliminación del calomelano como desecho peligroso
Filtros de selenio	El filtro de selenio es un material inerte poroso, empapado en ácido selénico, que se pone a secar para precipitar selenio rojo amorfo. El selenio rojo amorfo reacciona con el mercurio en el gas para formar HgSe.	95% – concentración de entrada de 1000 µg/m ³ 71% – concentración de entrada de 42 µg/m ³	Especialmente idóneos para concentraciones de mercurio bajas en el gas Instalación exitosa en plantas metalúrgicas	Concentración limitada del mercurio de entrada El filtro agotado debe ser eliminado de forma ambientalmente racional
Lechos de filtros de carbón activado	El carbón activado es bien conocido por sus propiedades adsorbentes. En el caso de la adsorción de mercurio, el carbón activado puede adsorber normalmente 10 a 12% de su propio peso.	97% – concentración de entrada de 1,200 µg/m ³ 93% – concentración de entrada de 37 µg/m ³	El carbón activado impregnado de azufre está a la venta Elimina el Hg ⁰ y otras sustancias Bajo potencial de lixiviación del mercurio contenido en el carbón agotado	Es inevitable que el carbón agotado sea eliminado en vertederos
DOWA	Se basa en la adsorción de mercurio en piedra pómez recubierta de sulfuro de plomo	97% – concentración de entrada de 50 µg/m ³ 88% – concentración de entrada de 11 µg/m ³		En sentido general, no se utiliza Eliminación del sulfuro mercúrico como desecho peligroso
Jerritt	Se basa en la conversión del mercurio elemental en cloruro de mercurio (II) mediante reacción con cloro Cl ₂ disuelto	99.97%	Eficiencia de eliminación del mercurio muy alta	Los subproductos se deben eliminar conforme a lo establecido en los artículos pertinentes del Convenio

^a Datos sobre la eficacia, basados en los datos correspondientes al horno de fundición de cobre, plomo y zinc en la planta Rönnskärnsverken de Boliden, comunicados en CEPE 2013

4.1.1 Otras consideraciones al seleccionar el tipo de control del mercurio durante el proceso de tostación y fundición en el sector de la metalurgia no ferrosa

Los principios generales para optar por una u otra de las mejores técnicas disponibles en el caso de las categorías de fuentes puntuales incluidas en el anexo D se describen en la introducción de las presentes directrices. En esta parte examinamos algunos aspectos adicionales de la química del mercurio, que podrían influir en la selección de los controles del mercurio en el sector de la metalurgia no ferrosa. La intención no es que sean prescriptivos, ya que tal vez sean menos aplicables a algunos de los metales incluidos en el anexo D, en particular el oro.

El mercurio puede estar presente en los gases dimanantes de las operaciones de fundición y tostación en la forma de mercurio elemental (Hg^0) o mercurio oxidado (Hg^{2+}), y en estado gaseoso o particulado. En muchos casos, el mercurio oxidado se puede eliminar con eficacia en los sistemas normales de depuración de gases empleados en estos procesos para controlar los gases ácidos (SO_2 , NO_x) y las partículas finas. Por eso es fundamental que esos sistemas funcionen correctamente para alcanzar un contenido total de mercurio residual bajo en el gas depurado. Esto tiene importancia especial en el caso de los precipitadores electrostáticos húmedos en los sistemas de depuración de gases por vía húmeda. La depuración eficaz de los gases es importante también, debido a que las impurezas del gas podrían causar reacciones colaterales indeseadas en la etapa de eliminación del mercurio. Por ejemplo, el filtro de selenio, que es del tipo de lecho fijo, reacciona cuando se deposita polvo sobre las partículas porosas activas.

Es muchísimo más difícil eliminar el mercurio elemental que el mercurio oxidado y la mayoría de las tecnologías comerciales están diseñadas para eliminar mercurio elemental en forma de vapor y dependen de la depuración convencional de los gases en la etapa inicial del proceso para lograr la máxima eliminación del mercurio. La etapa de eliminación del mercurio normalmente se instala cuando la depuración convencional de los gases resulta insuficiente para eliminar cantidades de mercurio satisfactorias debido al contenido de mercurio de la materia prima o a las características del mineral en bruto.

En el Cuadro se resumen algunos de los factores que influyen en la distribución del mercurio en un sistema de depuración de gases en los hornos de fundición.

Cuadro 6

Algunos factores que influyen en la distribución del mercurio en un sistema de depuración de gases, según (Holmström *et al.* 2012)

Características del gas	Consecuencia para la distribución del mercurio
Presencia de Se o de S^0 o alternativamente $H_2S_{(g)}$	Formación de $HgSe$ o HgS (partículas) → recuperadas con filtros de bolsa y precipitador electrostático húmedo
Carga muy elevada de Hg elemental en el sistema de enfriamiento de gases	Formación y condensación de Hg elemental líquido en todo el sistema
Alta temperatura de los gases después de su enfriamiento en una torre en el proceso BN	Da por resultado un contenido relativamente alto de Hg^0 después de la depuración en la torre BN
Función del precipitador electrostático húmedo	Es necesario una elevada eficacia; de lo contrario, las partículas muy saturadas de Hg se transferirán al ácido
Presencia de Hg oxidado en el gas procesado en un filtro de bolsa	Una cantidad mayor de Hg en el polvo recogido en el filtro de bolsa

Los requisitos de pureza de los gases en el caso de los procesos de eliminación del mercurio son prácticamente los mismos que para las plantas de ácido sulfúrico. En el caso específico del proceso Boliden-Norzink (BN), la presión de los vapores de mercurio de los líquidos circulantes responde a la temperatura. Por esa razón, la temperatura del gas de entrada debe ser lo más baja posible. En el cuadro 6 se indican los requisitos normales para el gas de entrada en la etapa de eliminación del mercurio de los procesos BN, con tiosulfato y con filtro de selenio.

Cuadro 7

Calidad del gas y propiedades que debe tener el gas de entrada en la etapa de eliminación de mercurio de los procesos BN, con tiosulfato y con filtro de selenio (datos industriales proporcionados por Outotec)

Parámetro	Proceso BN	Proceso con tiosulfato	Filtro de selenio
Polvo	máx. 1 mg/Nm ³	máx. 1 mg/Nm ³ (después de la etapa con el precipitador electrostático húmedo)	máx. 10 mg/Nm ³
Niebla de ácido sulfúrico	máx. 20 mg/Nm ³	máx. 20 mg/Nm ³ (después de la etapa con el precipitador electrostático húmedo)	máx. 20 mg/Nm ³
Temperatura de los gases	máx. 40°C	no es crítica	máx. 90°C

Outotec, el principal distribuidor de tecnologías de control del mercurio para el proceso de fundición, ha descrito un método para seleccionar la tecnología (Holmström *et al.* 2012) en casos en los que sea necesario eliminar de los gases la mayor cantidad posible de mercurio. Las tres tecnologías descritas son el proceso Boliden-Norzink; el filtro de selenio para su uso en un lecho estático con flujos de gas relativamente pequeños; y un filtro de carbón activado para su uso en un lecho estático o por inyección de carbón activado en el filtro de bolsa situado al inicio del proceso. Según Outotec, las condiciones del proceso determinan la selección (Holmström *et al.* 2012), que puede ejemplificarse simplemente en el diagrama presentado en la **Figura 7**.

Esta cifra es orientativa de la posible opción tecnológica y tal vez no sea apropiada en muchos casos, por ejemplo, cuando el selenio está presente en el concentrado. Esta tecnología tal vez no sea necesaria, cuando el uso de un equipo de depuración de gases se combina con una planta de ácido sulfúrico, ya que de esta forma se controlan suficientemente tanto el mercurio como las emisiones de azufre.

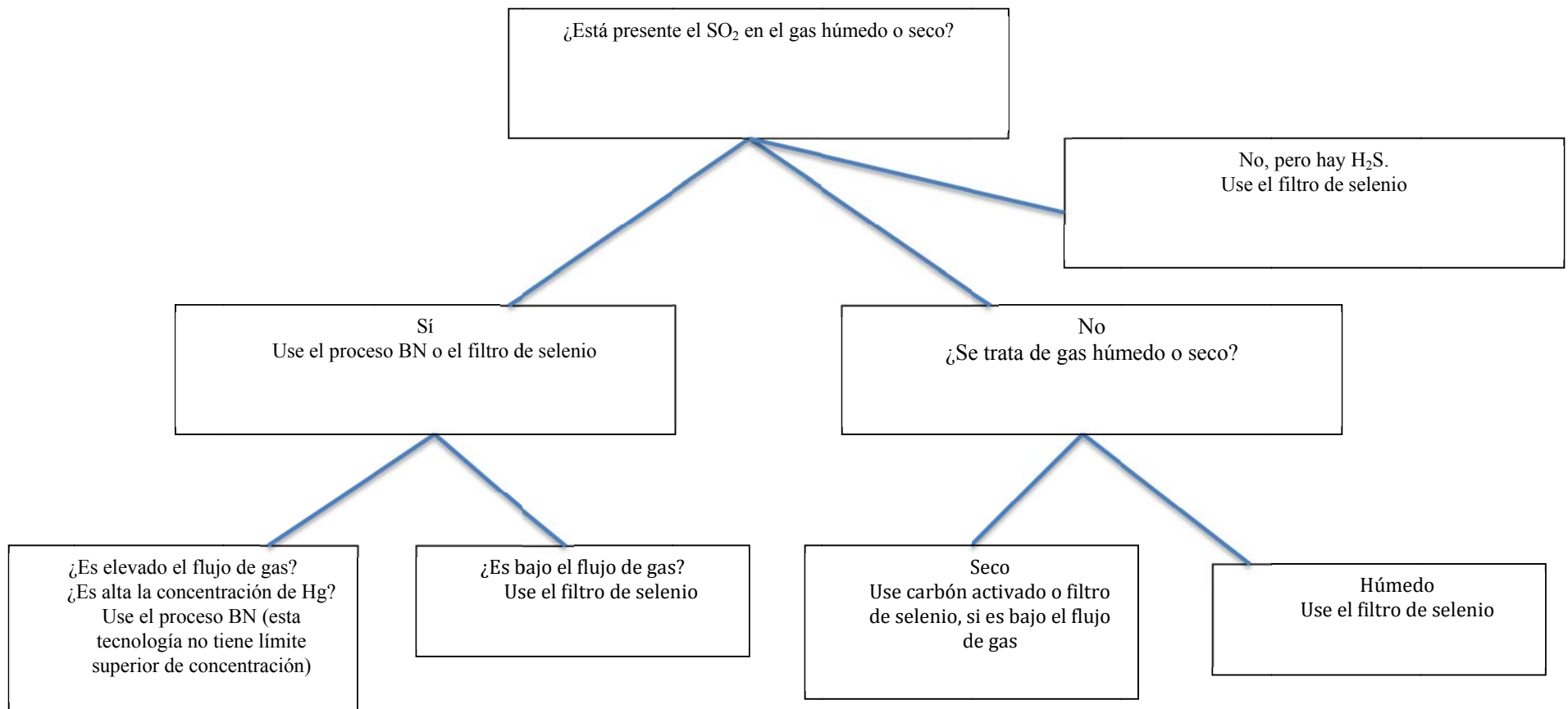


Figura 7: Consideraciones sobre el control del mercurio cuando sea indispensable eliminar una gran cantidad de mercurio y se pueda optar entre el proceso BN, el de filtro de selenio y el de carbón activado

4.2 Mejores prácticas ambientales

En esta sección se describen las mejores prácticas ambientales para controlar y, de ser viable, reducir, las emisiones de mercurio a la atmósfera dimanantes de los procesos de tostación y fundición empleados en la producción de metales no ferrosos.

Para elaborar y aplicar las mejores prácticas ambientales específicas, hace falta una planificación cuidadosa y un compromiso a todos los niveles en la empresa. La elaboración de las mejores prácticas ambientales puede facilitarse tomando en consideración los reglamentos aplicables, los controles administrativos y las prácticas de gestión de la planta.

4.2.1 Sistemas de gestión ambiental

Un sistema de gestión ambiental es un método estructurado para la gestión de los aspectos ambientales de una operación que se caracterice por incluir: un examen de los objetivos ambientales de la empresa; el análisis de sus riesgos ambientales, sus efectos y sus obligaciones jurídicas; el establecimiento de objetivos y metas ambientales para reducir los efectos en el medio ambiente y cumplir los requisitos jurídicos; el establecimiento de programas para cumplir esos objetivos y metas; la monitorización y medición de los progresos logrados en la consecución de los objetivos; la creación de conciencia y sentido de responsabilidad entre los empleados en relación con el medio ambiente; y el examen de los progresos logrados por el sistema y su mejora constante. Las recomendaciones para la aplicación pueden ser las siguientes:

- Elaborar y ejecutar programas de mantenimiento preventivos, predictivos y correctivos con miras al funcionamiento eficaz de los sistemas de reducción de la contaminación;
- Dar mantenimiento al equipo de producción para facilitar su funcionamiento normal y reducir al mínimo las alteraciones en el proceso;
- Mejorar la gestión operacional, establecer planes para imprevistos, impartir capacitación a los operadores periódicamente;
- Ejecutar un programa de prevención de los derrames y aplicar prácticas idóneas de administración en toda la instalación;
- Establecer un plan de monitorización para la medición del mercurio en las etapas pertinentes del proceso;
- Establecer y mantener un registro general de las emisiones de mercurio a nivel de los procesos e instalaciones pertinentes.

4.2.2 Mezcla de materias primas para controlar las emisiones de mercurio

La mezcla es un procedimiento operativo realizado para producir un suministro estable y homogéneo mezclando minerales en bruto o concentrados de calidades diferentes, combinando los minerales o concentrados con los fundentes o incorporando a la mezcla diferentes materiales primas secundarias. La mezcla se puede usar para controlar las emisiones de mercurio cuando la materia prima que alimenta el horno de fundición es muy variable o sus concentraciones de mercurio son más altas que lo conveniente. El tratamiento de una mezcla estable y homogénea facilita el mantenimiento de condiciones de funcionamiento constantes en las que los controles de la contaminación puedan funcionar con más eficacia. Además, un contenido de mercurio más bajo en general en el material que entra en el horno de fundición generaría concentraciones reducidas de mercurio en el gas residual y disminuiría las emisiones de mercurio hacia el depósito final. En algunos casos específicos, es posible que el mineral en bruto tenga un contenido de mercurio muy bajo y tal vez no haga falta aplicar medidas de control adicionales para lograr bajas emisiones.

En el caso de las fuentes que practican la mezcla, se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- La operación de mezcla puede levantar mucho polvo, por lo que se deben aplicar al máximo medidas de contención, extracción de partículas y de polvo. El polvo recogido debe incorporarse nuevamente al proceso.
- Se pueden usar también mezclas húmedas para evitar la producción de polvo. En algunos casos, se produce una suspensión acuosa espesa, de la que se extrae el agua, y esa suspensión se utiliza en un proceso de nodulización.
- Para lograr mezclas exactas, se deben extraer de antemano algunas muestras de la materia prima para analizar el contenido de metal que hay que tener en cuenta, en particular impurezas como el mercurio. Las mezclas se deben planificar mediante la combinación de las proporciones apropiadas de materia prima sobre la base de esos resultados. Para lograr esas mezclas exactas, se pueden usar instalaciones de mezcla,

sistemas de dosificación por pérdida de peso, básculas de cinta y la determinación de los volúmenes cargados.

4.2.3 Emisiones de mercurio a la atmósfera

Será conveniente aplicar medidas y estrategias de control para generar menos emisiones de mercurio. Es menester prestar atención al diseñar equipos de depuración de gases, en particular, las chimeneas, para que sean las adecuadas a las condiciones meteorológicas, topográficas y ambientales del lugar donde se van a instalar. Hay que tratar de captar las emisiones que se escapan de fuentes puntuales, que razonablemente puedan retenerse mediante sistemas de aspiración de gases y la hermetización apropiada de los equipos. Se recomienda la aplicación de las medidas siguientes:

- Optimización del diseño del proceso para reducir las emisiones de gases residuales y el contenido de contaminantes; diseño de funcionamiento ininterrumpido cuando sea técnica y económicamente viable;
- Funcionamiento de los hornos y los reactores bajo presión negativa y aplicación de las técnicas de depuración de gases apropiadas a los gases extraídos;
- Hermetización de los hornos y los reactores, y modificación de los hornos existentes hermetizándolos al máximo;
- Monitorización de los parámetros para prevenir la condensación de los gases de combustión y la corrosión de las tuberías causada por el exceso de humedad;
- Ejecución de un programa de detección de fugas y reparación de los orificios, de ser necesario;
- Aplicación de medidas correctivas a cualquier equipo que genere emisiones fugaces importantes.

4.2.4 Control de partículas

Es importante el control de la materia particulada porque el mercurio se combina con ella. Los métodos de control de partículas deben considerarse durante la etapa de planificación y se debe hacer un seguimiento de las emisiones. Las fábricas deben mejorar constantemente los controles de partículas durante las operaciones, en particular:

- Detectar e inspeccionar periódicamente las posibles fuentes de partículas;
- Usar sistemas de extracción de polvo con los controles de partículas apropiados para eliminar las partículas de las áreas de trabajo y los edificios;
- Usar estructuras de presión negativa para encerrar los equipos que crean partículas e impedir la salida de gases que contengan partículas;
- Instalar precipitadores de polvo con más de una cámara para poder realizar inspecciones y efectuar el mantenimiento durante el funcionamiento;
- Mantener buenos resultados en el precipitador de polvo mediante inspecciones periódicas y la sustitución de las bolsas.

4.2.5 Gestión y eliminación ambientalmente racionales de los desechos derivados del control de la contaminación atmosférica

Con miras a prevenir las emisiones innecesarias, las fábricas deben aplicar los siguientes métodos para lograr la gestión y eliminación apropiadas de los residuos generados por los dispositivos de control de la contaminación atmosférica:

- Almacenamiento y transporte en condiciones de seguridad de los desechos de mercurio derivados de los controles de la contaminación atmosférica (p. ej., mercurio elemental líquido recuperado de las retortas o cloruro de mercurio (I) producido durante el proceso Boliden-Norzink);
- Comercio de mercurio solo conforme a lo dispuesto en el artículo 3 del Convenio;
- Eliminación de los desechos de mercurio conforme a lo dispuesto en los demás artículos pertinentes del Convenio.

5 Monitorización del mercurio en los procesos de fundición y afino durante la producción de metales no ferrosos

Los aspectos generales e interrelacionados de ensayo, monitorización y presentación de informes se analizan en la introducción del presente documento. En esta sección se analizarán aspectos específicos de la monitorización de las emisiones de mercurio inherentes a los procesos aplicables a los metales no ferrosos.

En el sector de fundición y afino de metales no ferrosos, la materia prima de entrada, que puede contener mercurio, son los concentrados, los fundentes y el combustible. Además de los metales acabados, las corrientes de productos pueden incluir polvos metálicos, compuestos metálicos, ácido sulfúrico y fertilizantes. Las corrientes de subproductos podrían ser escorias, calomelano (cloruro de mercurio (I), Hg_2Cl_2), mientras que las corrientes de desechos pueden incluir escorias, calomelano, fangos y precipitados extraídos del equipo de control de la contaminación.

Las emisiones de mercurio pueden variar considerablemente en el tiempo dentro de una misma instalación o entre instalaciones que llevan a cabo procesos análogos, debido a que el contenido de mercurio varía en la materia prima que se incorpora durante el proceso. Las concentraciones de mercurio pueden cambiar rápidamente en los concentrados, el combustible y otros insumos, como la chatarra. Cuando se realice el muestreo, se debe poner cuidado, en la medida de lo posible, para garantizar que el proceso funcione ininterrumpidamente y represente las condiciones normales de funcionamiento, que las concentraciones de mercurio en las corrientes de entrada representen las cantidades que suelen alimentarse y que se reduzcan al mínimo las emisiones fugaces. Si las condiciones de funcionamiento no son las habituales, la extrapolación de los datos de muestreo posiblemente arroje resultados con un gran margen de error.

Debido a la diversidad de los procesos empleados en el sector de fundición y afino de metales no ferrosos, es posible que haya variaciones significativas en los procesos, incluso entre instalaciones que producen el mismo tipo de metal. Las características específicas del lugar deben tenerse en cuenta a la hora de seleccionar el método de monitorización más apropiado y planificar la labor de muestreo. Además de recopilar datos sobre las emisiones de mercurio, también se recomienda informar sobre la cantidad de metal producido para poder calcular las emisiones de mercurio por tonelada de metal.

5.1 Métodos de medición directa

5.1.1 Muestreo por borboteadores

El muestreo por borboteadores con productos químicos húmedos ha sido el método tradicional de muestreo usado para medir concentraciones de mercurio en los gases en el sector de fundición y afino de metales no ferrosos. Debido a la complejidad y al costo de este método, el muestreo por borboteadores se practica con menos frecuencia, por ejemplo cada trimestre o cada año. Pese a la fiabilidad de los datos que se obtienen con este método, los resultados tal vez no sean representativos, si se registran concentraciones de mercurio variables durante períodos breves.

5.1.2 Trampas sorbentes y sistemas de monitorización por trampas sorbentes

En el sector de fundición y afino de los metales no ferrosos, la monitorización por trampas sorbentes se puede usar con eficacia para proporcionar datos sobre las concentraciones de mercurio en los gases de escape durante determinados lapsos de tiempo. Aunque este método no proporcione resultados en tiempo real, los datos obtenidos indicarán el rendimiento operativo durante el período de tiempo precedente. Con este método basado en el circuito de realimentación, se pueden introducir ajustes en el proceso, de ser necesario.

La monitorización con trampas sorbentes es eficaz en las corrientes de gases con bajas concentraciones de partículas. En las plantas de metales no ferrosos, el depósito de salida final suele ser el lugar apropiado para instalar un sistema de monitorización de trampas sorbentes. En esta etapa, el gas limpio depositado debe contener bajos niveles de mercurio, partículas y otros contaminantes.

5.1.3 Sistemas de monitorización continua de las emisiones

Todavía no se ha generalizado el uso de sistemas de monitorización continua de las emisiones (SMCE) de mercurio en el sector de fundición y afino de metales no ferrosos. Los SMCE se han usado de ordinario para la medición de bajos niveles de concentración de mercurio en magnitudes de flujo de gases de escape elevadas, como es el caso de las centrales eléctricas alimentadas por carbón. En comparación, muchas instalaciones de fundición de metales no ferrosos emiten gases de escape químicamente más complejos con magnitudes de flujo más bajas y niveles de concentración de mercurio más altos en corrientes de gases más complejas.

En instalaciones en las que funcionan varias chimeneas, tal vez sea más conveniente instalar el SMCE en la última para monitorizar las liberaciones al medio ambiente. En esa etapa final del proceso, los gases de chimenea deben haber sido sometidos a procesos de depuración, en los que se habría eliminado ya la mayoría de los contaminantes

atmosféricos presentes en esos gases, por ejemplo, mediante controles de las partículas, eliminación del mercurio y producción de ácido. Los datos recopilados proporcionarían las tendencias indicativas en tiempo real que tienen que ver con la eficacia del funcionamiento. Cuando se conoce la cantidad de mercurio presente en las corrientes de entrada, se puede calcular la eficacia de eliminación a partir de los datos de monitorización continua de las emisiones.

5.2 Métodos de medición indirecta

5.2.1 Balance de materia

Si bien un balance de materia proporcionaría datos para un período de tiempo determinado y no en tiempo real, tal vez sea conveniente como instrumento indicativo para determinar el rendimiento operativo y la eficacia de eliminación del mercurio, siempre y cuando el contenido de mercurio en la materia prima, los productos y otras corrientes fundamentales sea suficiente para poder realizar cálculos fiables.

El funcionamiento normal de una planta de fundición y afino de metales no ferrosos debe incluir ya el muestreo periódico y la realización de análisis (análisis químicos) del contenido de metales en las materias primas, los productos y demás corrientes importantes para asegurar el control eficaz del proceso. La inclusión de mercurio en un analito de esas corrientes arroja datos esenciales que se han de utilizar en el balance de materia. El proveedor de combustible puede suministrar información sobre el contenido químico del combustible vendido. Dado que en la fundería o la refinería se suelen llevar a cabo diariamente análisis internos de ensayo del contenido de metales de sus principales insumos y productos, se debe considerar la posibilidad de que se realicen en la instalación sus propios análisis del mercurio, que son cada vez más costosos.

Para calcular las emisiones anuales de mercurio de una instalación que usa el balance de materia, se deben determinar y registrar las concentraciones de mercurio y las magnitudes de flujo de la materia prima de todas las corrientes durante todo el transcurso del año, lo que requiere un esfuerzo supremo. Además, se deben determinar todas las corrientes que pueden acumular mercurio. Los datos sobre el volumen de mercurio se calculan multiplicando la concentración de mercurio por la tasa de flujo másico y el tiempo (por ejemplo, un año).

Debido a la variabilidad inherente a las mediciones de la magnitud de flujo de la materia prima que contiene mercurio y a las mediciones de la acumulación de mercurio, así como a la multiplicidad de flujos de entrada y salida, tal vez sea difícil proponer una cifra definitiva en relación con el balance de masa. En el caso de procesos bien controlados, en que la magnitud de las emisiones de mercurio es solo una fracción del ritmo de alimentación de mercurio, sería más apropiado efectuar mediciones directas de los flujos de gases de escape mediante el muestreo que completar el balance de masa.

5.2.2 Sistemas predictivos de monitorización de las emisiones

Los sistemas predictivos de monitorización de las emisiones (SPME) tal vez no sean un método fiable de monitorización de las emisiones de mercurio en el sector de fundición y afino de los metales no ferrosos. En este sector, el contenido de mercurio en la materia prima de los hornos puede cambiar significativamente en períodos breves, según los concentrados que se procesen. Incluso en una instalación que procese concentrados de una mina específica, el contenido de mercurio puede variar sustancialmente, según el lugar de donde se extrae la mena. Esto da por resultado que el establecimiento de correlaciones entre los parámetros sustitutivos y las emisiones de mercurio tal vez no arroje resultados representativos. Si se considera el uso de un sistema predictivo de monitorización de las emisiones, se debe realizar ante todo un análisis minucioso para determinar la incertidumbre del método caso por caso.

5.2.3 Factores de emisión

En el caso del sector de fundición y afino de metales no ferrosos, las emisiones de mercurio pueden variar muchísimo en el transcurso del tiempo en una misma instalación o entre instalaciones que llevan a cabo procesos análogos, debido al cambio del contenido de mercurio en los flujos de entrada. En consecuencia, cuando se usen factores de emisión, las estimaciones de las emisiones pueden tener un alto margen de error. En particular, las estimaciones que usan factores de emisión publicados de carácter general deben considerarse un indicio aproximado de los niveles de emisión. Un método alternativo sería establecer factores de emisión específicos del lugar basados en datos de muestreo reales y en información sobre la actividad en las fuentes.

6 Referencias

- PNUMA (2008). Technical Background Report to the Global Atmospheric Mercury Assessment, Arctic Monitoring and Assessment Programme/UNEP Chemicals Branch, 159 pp.
- PNUMA (2013). Technical Background Report for the Global Mercury Assessment 2013, Arctic Monitoring and Assessment Programme/UNEP Chemicals Branch, vi + 263 pp.
- BREF NFM (2014). Best Available Techniques Reference Document for the Non Ferrous Metals Industries (BREF NFM), available at: http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/NFM_Final_Draft_10_2014.pdf, IPTS, Joint Research Centre (JRC), European Commission, Seville, Spain, 1242 pp.
- Coleman, R.T.J. (1978). Emerging Technology in the Primary Copper Industry. Prepared for the U.S. EPA; data2.collectionscanada.ca/pdf/pdf001/p000001003.pdf; accessed on 7 April 2014, Habashi, F. (1978). Metallurgical plants: how mercury pollution is abated. *Environmental Science & Technology* 12, pp. 1372–1376.
- Holmström, Å., L. Hedström, A. Målsnes (2012). Gas Cleaning Technologies in Metal Smelters with Focus on Mercury. Sino-Swedish Cooperation on Capacity Building for Mercury Control and Management in China (2012–2013). Outotec.
- Hultbom, K. B. (2003). Industrially proven methods for mercury removal from gases. EPD congress, The Minerals, Metals & Materials Society (TMS).
- Krumins T. , C. Stunguris, L. Zunti and S Blaskovich (2013). Mercury removal from pressure oxidation vent gas at Newmont Mining Corporation's Twin Creek Facility. *Proceedings of Materials Science and Technology*. Montreal QC; The Minerals, Metals and Materials Society, 129-144
- Morgan, S. (1968). The Place of the Imperial Smelting Process in Non-ferrous Metallurgy.
- Reimers, J. H., et al. (1976). A review of Process Technology in Gases in the Nonferrous Metallurgical Industry for the Air Pollution Control Directorate, nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=91018I2W.txt; accessed on 7 April 2014, Jan H. Reimers and Associates Limited, Metallurgical Consulting Engineers, Oakville, Ontario, Canada.
- Schulze, A. (2009). Hugo Petersen – Competence in gas cleaning systems downstream nonferrous metallurgical plants. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy – Sulphur and Sulphuric Acid Conference 2009, pp. 59–76.
- Sundström, O. (1975). Mercury in Sulfuric Acid: Bolden Process Can Control Hg Levels during or after Manufacture. *Sulfur* No. 116, The British Sulfur Corp., January–February 1975: pp. 37–43.
- Takaoka, M., D. Hamaguchi, R. Shinmura, T. Sekiguchi, H. Tokuchi (2012). Removal of mercury and sulfuric acid production in ISP zinc smelting. International Conference on Mercury as a Global Pollutant, Abstract 16-PP-107.
- UNECE (2013). Guidance document on best available techniques for controlling emissions of heavy metals and their compounds from the source categories listed in annex II to the Protocol on Heavy Metals, UN Economic Commission for Europe: Executive Body for the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution, 33 pp.

